

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Faculdade de Engenharia de Bauru

LUCAS FARIAS DE MENEZES

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM UMA INDÚSTRIA GRÁFICA

BAURU/SP
NOVEMBRO/2021

OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM UMA INDÚSTRIA GRÁFICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Bauru, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Adj. Antonio Roberto Balbo
Coorientadora: Profa. Dra. Adriana Cristina Cherri

BAURU/SP
NOVEMBRO/2021

M543o Menezes, Lucas Farias
Otimização do consumo energético em uma indústria gráfica /
Lucas Farias Menezes. -- Bauru, 2021
68 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Antonio Roberto Balbo
Coorientador: Adriana Cristina Cherri

1. Otimização. 2. Eficiência Energética. 3. Energia Elétrica. 4.
Planejamento Programação e Controle da Produção. 5. Indústria
Gráfica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUCAS FARIAS DE MENEZES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de agosto do ano de 2021, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de LUCAS FARIAS DE MENEZES, intitulada **OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM UMA INDÚSTRIA GRÁFICA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof^a. Dr^a. SONIA CRISTINA POLTRONIERE SILVA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Matemática / Faculdade de Ciências de Bauru - UNESP, Prof^a. Dr^a. CARLA TAVIANE LUCKE DA SILVA GHIDINI (Participação Virtual) do(a) Faculdade de Ciências Aplicadas / Câmpus de Limeira / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da

Comissão Examinadora.



Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO BALBO

Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru -

Av. Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, , 14-01, 17033360, Bauru -

São Paulo http://www.feb.unesp.br/posgrad_elet/index.phpCNPJ:

48.031.918/0030-69.

*Dedico aos meus Pais Antonio Cesar e Regina (in memoriam),
À minha Vó Ceda,
À minha Esposa Rayne,
Ao grande amigo irmão Me. Guilherme Donizeti (in memoriam).*

*“Quando expressamos nossa gratidão, não devemos nos esquecer de que a forma mais elevada de estima não é
dizer palavras de agradecimento, mas viver segundo elas”
(John F. Kennedy)*

Agradecimentos

À Deus pela oportunidade poder fazer parte de uma família gigante em amor, carinho e cativação e por ter amigos em quem poder confiar.

Ao meu Pai Antonio Cesar e à minha Vó Ceda, por nunca medirem esforços durante toda minha vida ao se dedicarem sempre no investimento em meus estudos e em consequência disso chegar onde estou hoje, sem eles isso não teria sido possível.

À minha Esposa Rayne, que foi minha fortaleza durante toda a minha graduação e uma incentivadora pós-graduação, sempre me motivando e dando forças à nunca desistir dos estudos e com quem hoje compartilho minha vida.

Ao grande profissional e meu orientador Balbo, pelos muitos ensinamentos, conselhos, e principalmente pela enorme paciência, dedicação e confiança em mim durante estes anos.

Em especial à Tatiane Miguel Rodrigues, pelas conversas nos motivacionais em meus primeiros anos de graduação e por me proporcionar o primeiro contato com o mundo acadêmico, através da minha primeira iniciação científica.

Ao grande amigo e irmão que a vida me apresentou, o saudoso Ms. Guilherme Donizeti (*in memoriam*) por ser um grande exemplo de pessoa, que me inspirou muito em concluir meu trabalho e com quem tive o grande prazer de conviver.

Aos amigos que torceram pelo meu sucesso e ainda à todos que de certa forma contribuíram direta ou indiretamente comigo na produção deste trabalho.

Resumo

Neste trabalho é proposto um modelo matemático de programação linear inteira para auxiliar o setor de Programação, Planejamento e Controle da Produção de uma indústria gráfica, que busca minimizar o custo de consumo de energia elétrica ou o tempo operacional das máquinas, relativos à designação e utilização de conjuntos distintos de máquinas de impressão e máquinas de acabamento dos itens comercializados por essa indústria. O modelo respeita restrições operacionais da indústria, tais como os limites de tempo de *setup* e de operação das máquinas, especificidades do item impresso e de capacidade de produção. O modelo proposto foi implementado em uma linguagem algébrica de programação (GAMS-CPLEX) e testes computacionais foram realizados com exemplares fornecidos por uma indústria gráfica situada na cidade de Bauru, São Paulo. Após a atribuição das máquinas feita pelo modelo, foi realizada uma análise posterior denominada de heurística para ajustamento da produção, de interesse da indústria, que visa sequenciar, programar e controlar a produção dos itens em turnos periódicos de produção.

Palavras-chave: Otimização. Eficiência Energética. Energia Elétrica. Planejamento e Controle da Produção. Indústria Gráfica

Abstract

This work proposes a mathematical model to help the Programming, Planning and Production Control sector of a printing industry, which seeks to minimize the consumption cost of electrical energy or the operational time, related to the assignment and utilization of different sets of printing machines and finishing machines for the items sold by this company. The model respects the operational constraints of the industry, such as setup and operating time bounds of the machines, printed item specificities and production capacity. The proposed model was implemented in an algebraic programming language (GAMS-CPLEX) and preliminary computational tests were carried out with data provided by a graphic industry located in the Bauru's city. After the assignment of the machines made by the model, a posterior analysis was performed which was nominated of production adjustment heuristic, that is of interest to the industry and it aims to sequence, to program and to control the production of items in a periodic setting of the production.

Keywords: Optimization. Energy Efficiency. Electricity. Planning and production control. Graphic industry.

Sumário

Lista de Siglas	3
Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas	5
Introdução	6
1. Revisão bibliográfica e estado da arte.....	9
2. A Indústria Gráfica.....	14
2.1. Indústria gráfica no Brasil.....	14
2.2. Os números da Indústria Gráfica.....	16
2.3. A Estrutura <i>Offset</i>	17
2.3.1. Chapas	18
2.3.2. Tintas.....	19
2.3.3. Substrato.....	20
2.3.4. Impressoras <i>Offset</i>	20
2.4. <i>Workflow</i> da Indústria Gráfica	23
2.4.1. Captação de Clientes e itens.....	26
2.4.2. Pré análise da Ordem de Produção e insumos necessários	26
2.4.3. Máquinas de impressão	27
2.4.4. Máquinas de Acabamento	27
2.5. Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP)	28
3. Problema de PPCP na Indústria Gráfica	30
3.1. Descrição do problema relacionado ao PPCP	30
3.2. Modelo Matemático	31
4. Testes computacionais - Estudos de caso.....	36
4.1. Resultados obtidos com a minimização do custo de consumo ou do tempo operacional.....	38
4.1.1. Carteira de Pedidos I – 10 itens.....	38
4.1.2. Carteira de Pedidos II – 20 itens	41
4.1.3. Carteira de Pedidos III – 50 itens	42
4.2. Heurística para o ajustamento da produção	45
Conclusões	54
Trabalhos apresentados e publicados	56
Referências Bibliográficas.....	57

Apêndice A - A Programação Linear Inteira (PLI) e os problemas de designação de tarefas, de dimensionamento de lotes e de sequenciamento de lotes60

Lista de Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABIGRAF	Agência Nacional das Indústrias Gráficas
CTP	Computer to Plate
OP	Ordem de Produção
PLI	Programação Linear Inteira
PPCP	Planejamento, Programação e Controle da Produção

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de tipógrafo.....	14
Figura 2 – Sistema da impressão em rotogravura.	15
Figura 3 – Comparação dos portes das Indústrias Gráficas no Brasil.....	16
Figura 4 – Distribuição de empresas e funcionários por região	17
Figura 5 – Segmentos de produtos do setor gráfico no Brasil.....	17
Figura 6 – Gravação de chapa	18
Figura 7 – Chapa gravada.....	19
Figura 8 – Composição de cores (CMYK).....	20
Figura 9 – Impressora <i>Offset</i>	21
Figura 10 – Sistema de impressão	21
Figura 11 – Cilindros do conjunto impressor de uma Impressora <i>Offset</i>	22
Figura 12 – Cilindro de Tracionamento	22
Figura 13 – Remalinas.....	23
Figura 14 – Impressora <i>offset</i> rotativa.....	23
Figura 15 – Layout e disposição das máquinas	28
Figura 16 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira I (minimização do custo de consumo).....	47
Figura 17 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira II (minimização do custo de consumo).....	47
Figura 18 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira III (minimização do custo de consumo)	49
Figura 19 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira I (minimização do tempo operacional)	50
Figura 20 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira II (minimização do tempo operacional).....	51
Figura 21 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira III (minimização do tempo operacional)	52

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Artigos acadêmicos.....	10
Tabela 2 – Dados técnicos dos maquinários da indústria gráfica.....	36
Tabela 3 – Carteira I de itens de clientes.....	37
Tabela 4 – Carteira II de itens de clientes	37
Tabela 5 – Carteira III de itens de clientes	37
Tabela 6 – Distribuição dos itens por máquinas (custo de consumo).	38
Tabela 7 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia.....	39
Tabela 8 – Distribuição dos itens por máquinas (tempo operacional).	40
Tabela 9 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (tempo operacional).....	40
Tabela 10 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (custo de consumo).....	41
Tabela 11 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (tempo operacional).....	42
Tabela 12 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (custo de consumo).	43
Tabela 13 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (tempo operacional).....	44
Tabela 14 – Resumo Horizonte de Planejamento (Itens e Horas).....	52

Introdução

A grande integração entre os mercados, aliada ao desenvolvimento cada vez mais rápido de novos produtos tem aumentado a competitividade entre as indústrias. Dentro deste novo cenário, muitas empresas buscam melhorias em seus processos produtivos que abrangem desde a responsabilidade de planejar e aperfeiçoar os processos até sua estrutura organizacional.

As indústrias devem manter a competitividade entre as cadeias de suprimentos e para isso elas têm que traçar e reanalisar as estratégias internas de gerenciamento de materiais, sistemas e métodos de produção.

Tais estratégias devem ter como objetivo a garantia de que os processos de produção dos itens estejam alinhados com as intenções estratégicas da empresa no que se diz ao resultado financeiro dentro do mercado de atuação desta mesma empresa (Correa & Correa, 2006)

Entre os vários fatores que podem afetar os custos operacionais de uma empresa, podemos destacar, entre outros, o elevado consumo de energia elétrica que ocorre devido ao uso de maquinários antigos e o alto custo da tarifa elétrica em determinados horários.

No Brasil, as tarifas de energia elétrica são determinadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece também os critérios de classificação dos consumidores e as formas de cobrança de energia elétrica. De acordo com a concessionária de energia elétrica, no chamado ‘horário de ponta’, o custo da tarifa é mais elevado e, no Estado de São Paulo, ocorre entre 18h e 21h nos dias úteis, exceto no extinto horário de verão que ocorria entre 19h e 22h. De acordo com Soler et al. (2016), como as tarifas de energia elétrica variam ao longo do dia, torna-se necessário nas indústrias um planejamento dos turnos de funcionamento das máquinas.

Para Bermann (2002) existe a necessidade da implementação de políticas públicas que estabeleçam metas objetivas de redução do consumo de energia em grupos de indústrias, por meio de medidas que incentivem a modernização das plantas produtoras e o surgimento de inovações que possam reduzir o consumo energético no processo produtivo dos itens diárias das indústrias. Em contrapartida, Goldemberg (1998) conta que tais medidas são necessárias para reduzir o consumo, mas desde que não prejudique o crescimento econômico das indústrias e também do Brasil.

Visando uma melhor otimização dos recursos, associado às estratégias para o baixo consumo de energia elétrica, insere-se também a necessidade de melhor sequenciamento das demandas a serem produzidas. Desta forma, os problemas de sequenciamento de tarefas podem ser utilizados para auxiliar no processo de tomada de decisão.

O planejamento, a estratégia e o mapeamento de riscos são conceitos que movem o mundo dos negócios. Para posicionar-se no mercado, é necessário estar munido de técnicas que possibilitem a tomada de decisões de forma clara, objetiva e com o menor risco possível. Assim, para colocar-se à frente de seus concorrentes, uma empresa necessita de respaldo técnico em suas escolhas. Para isso, é necessária a aplicação de métodos consistentes que atendam às expectativas dos seus stakeholders.

(SANTOS et al., 2015)

Neste trabalho, considerando a utilização de conjuntos distintos de máquinas de impressão e máquinas de acabamento de produto em uma indústria gráfica, é proposto um modelo para auxiliar a otimização do Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP), que busca minimizar o custo de consumo de energia elétrica da indústria ou do tempo operacional das máquinas na confecção dos itens, respeitando-se restrições operacionais relativos aos limites de tempo de operação e de *setup* das máquinas de impressão, além de particularidades do item impresso e de capacidade de produção, considerando um horizonte de planejamento de produção da indústria. O horizonte de planejamento considerado no modelo é em jornada semanal ou mensal.

O modelo proposto foi implementado utilizando o *solver* CPLEX disposto no *software* GAMS e testes computacionais foram realizados em estudos de caso, considerando 3 carteiras de pedidos fornecidas por uma indústria gráfica situada na cidade de Bauru. Posteriormente à designação dos itens a serem produzidos nas máquinas de impressão e acabamento, é realizada uma heurística para o ajustamento da produção que respeita a designação feita no horizonte de planejamento e visa fazer a programação da produção desses em um ajustamento periódico nos respectivos turnos de produção da indústria, a qual é considerada nesse estudo. Destaca-se que, esse ajustamento tem relação com a subdivisão do PPCP definida de acordo com Lustosa et al (2008) e tem por objetivo, após a designação, sequenciar, programar e controlar a produção dos itens. O turno de produção considerado pode ser diário, semanal ou mensal.

O texto está organizado da seguinte forma: no Capítulo 1 é apresentada a revisão bibliográfica sobre a indústria gráfica e suas abordagens em diversos campos de estudo. No Capítulo 2 é mostrado alguns componentes indispensáveis para a indústria gráfica com algum detalhamento técnico, bem como uma explicação sucinta acerca do fluxo interno da indústria. No Capítulo 3 é apresentado o modelo matemático proposto para a produção, e uma breve abordagem acerca do problema de PPCP que é um dos motivadores deste trabalho. No Capítulo 4

apresentam-se os testes computacionais sobre estudos de caso realizados e os resultados obtidos, além de uma heurística para o ajustamento da produção e os diagramas obtidos a partir desta para os estudos de caso. As considerações finais, trabalhos apresentados e publicados, referências bibliográficas e o Apêndice A, que define um problema de designação, de dimensionamento de lotes e de sequenciamento da produção, compõem a parte final do texto.

1. Revisão bibliográfica e estado da arte

Este Capítulo contém uma revisão bibliográfica de trabalhos presentes na literatura e que estão relacionados à otimização do consumo energético em uma indústria gráfica.

Para definir os termos de pesquisa apropriados para busca nas bases de dados, foi feita uma busca prévia, observando os termos que apresentavam melhores resultados de busca para o assunto, sejam eles por citações, proximidade ao assunto e número de documentos encontrados. Assim, os termos escolhidos foram: (1) “Indústria gráfica”; (2) “Otimização”; (3) “Indústria gráfica” + “Otimização”; (4) “Indústria gráfica” + “Redução de custos”; (5) “Indústria gráfica” + “Energia elétrica”; (6) “Indústria gráfica” + “Otimização” + “Energia elétrica”; (7) “Indústria gráfica” + “Consumo de energia elétrica” e (8) “Indústria gráfica” + “custo de energia elétrica”.

A plataforma inicial de busca foi o Google Acadêmico e posteriormente o Science Direct. Na primeira, os termos escolhidos foram utilizados em português e na segunda em inglês. Em um segundo momento, foi feito um novo levantamento usando o portal de periódicos da Capes, também com os termos citados na língua inglesa. Foram selecionadas as áreas “Economia e negócios”, “Matemática”, “Engenharia” e “Estatística”. A Tabela 1 apresenta os resultados encontrados.

Tabela 1 – Artigos acadêmicos

Palavras	Google Acadêmico	Science Direct	Periódicos Capes
“Indústria gráfica” (<i>graphic industry</i>)	16.600	49.862	184
“otimização” (<i>optimization</i>)	958.000	+1.000.000	1.921.111
“Indústria gráfica” + “otimização” (“ <i>graphic industry</i> ” + “ <i>optimization</i> ”)	862	16.273	22
“Indústria gráfica” + “redução de custos” (“ <i>graphic industry</i> ” + “ <i>cost savings</i> ”)	683	4.164	3
“Indústria gráfica” + “energia elétrica” (“ <i>graphic industry</i> ” + “ <i>electricity</i> ”)	740	4.478	8
"indústria gráfica" + "otimização" + "energia elétrica" (“ <i>graphic industry</i> ” + “ <i>optimization</i> ” + “ <i>electricity</i> ”)	193	2.053	1
"indústria gráfica" + "consumo de energia elétrica" (“ <i>graphic industry</i> ” + “ <i>electricity consumption</i> ”)	103	3.019	2
"indústria gráfica" + "custo de energia elétrica" (“ <i>graphic industry</i> ” + “ <i>electricity cost</i> ”)	13	3.426	0

Fonte: autoria própria

Dessa forma, é possível perceber que o tema “otimização” é bem amplo, assim como “Indústria gráfica”, obtendo muitos resultados. No entanto, quando nessa pesquisa são adicionadas outras palavras, que se referem ao assunto deste trabalho, os resultados vão se afunilando, o que nos mostra poucos trabalhos que envolvem a indústria gráfica e um modelo de otimização do consumo de energia elétrica.

Dentre os resultados encontrados, foi feito um levantamento mais aprofundado com os trabalhos presentes na literatura que estejam relacionados à Indústria gráfica, a fim de entender melhor o contexto em que se encontram.

No trabalho de Espírito Santo (2004) é apresentada uma análise de forma geral do sistema de custeio utilizado na indústria gráfica e sua utilização nas empresas de pequeno e médio porte. São apresentados diversos fatores que influenciam nos custos dentro do segmento gráfico tais como despesas pessoais, depreciação, energia

elétrica, aluguel, materiais auxiliares e custos administrativos. Também é apresentada a metodologia de apuração RKW, na qual todos os custos e as despesas são alocados nos diversos centros de custos ou departamentos da empresa para que possam ser rateados a fim de que recaiam sobre os produtos, visando recuperar todos os gastos incorridos na empresa. Ainda segundo o autor, a apuração de todos os custos na indústria gráfica permitiu promover reduções reais de custos e impulsionar a competitividade.

Lima (2007) fez um estudo de caso em uma indústria gráfica, projetando e implementando, em uma célula-piloto, o layout celular ao invés do layout linear antes usado. Essa mudança trouxe alguns ganhos como aumento na produtividade e diminuição do tempo, de equipamentos, do número de pessoas, da área utilizada e da energia elétrica, além da eliminação de transportes.

Braun, Gomez e Merino (2007) apresentaram etapas para geração de um produto gráfico ecoeficiente que podem ser inseridas com o objetivo de contribuir para a sustentabilidade do setor e do meio ambiente. As etapas propostas são baseadas em outros estudos feitos anteriormente em diferentes indústrias como Tetra Pak, Banco Real e a Xerox, com o objetivo de diminuição do consumo de recursos naturais e da produção de resíduos e subprodutos gerados.

Oliveira (2009) apresenta um estudo da influência da estratégia de gestão dos itens sobre a gestão de estoques em duas empresas do setor gráfico, na qual uma adota o sistema *make-to-stock* e a outra *make-to-order*, como forma de priorizar a redução de custos e perdas e aumentar a qualidade de seus processos e produtos.

Teixeira, Korbes e Rossi (2009) avaliaram o equilíbrio corporal de indivíduos expostos à ruído ocupacional em uma indústria gráfica e tiveram resultados significantes que permitiram concluir que os indivíduos expostos ao ruído ocupacional apresentaram valores rebaixados de equilíbrio corporal em relação aos não expostos.

Pedrosa e Romero (2012) desenvolveram um algoritmo para auxiliar o planejamento do programa da produção com processos do tipo *Job-Shop* (sob encomenda) com estudo de caso em uma indústria gráfica. O algoritmo proposto determinou uma lista ordenada de operações para cada máquina, otimizando o tempo total de execução das tarefas e minimizando o tempo de ociosidade das máquinas.

Monteiro, Ventura e Martins (2013) relataram um método eficiente, simples e barato de executar para a remoção de alguns poluentes mais comuns envolvidos nas várias etapas da produção da Indústria gráfica, utilizando uma metodologia de extração em fase sólida.

Santos, Moreira e Leandro (2015) propõem alternativas para a redução do tempo gasto no processo produtivo de impressos, baseadas nos conceitos de mapeamento de processos e estruturação de arranjo físico. Realizaram também um estudo de caso que apontou a perda de tempo ao buscar ferramentas e materiais para a

realização das atividades, sendo a principal causa a distância entre o posto de trabalho e o almoxarifado. Dessa forma, as alternativas apresentadas possibilitaram um processo de produção mais enxuto.

Vargas, Coser e Souza (2016) apresentaram o mapeamento das atividades, os principais instrumentos de gestão utilizados e o processo de mensuração dos custos logísticos utilizados em uma empresa gráfica, como fim de obter melhoria do desempenho, da relação do atendimento ao cliente e da redução dos custos logísticos.

Correia (2016) trouxe um projeto de melhoria dos fluxos de material e informação nas áreas de Suporte de Impressão e do Setor de Planejamento em uma Indústria gráfica, o qual resultou em uma redução de desperdícios nas duas áreas de atuação, possibilitando que a empresa se torne mais eficiente e aumente sua competitividade.

Moreira (2017) estudou um Sistema de manutenção preventiva e de monitorização de falhas, tal como a otimização dos processos de produção relacionados com o setor de impressão *offset*, em uma indústria gráfica. Foram identificados tempos de preparação excessivos e algumas dificuldades de execução relacionadas com a falta de secagem de tintas. Obteve uma redução dos custos gerais com manutenção e melhorias significativas nos tempos de preparação de máquina e secagem de tintas.

Vaz (2019) fez um estudo dos processos de impressão em uma indústria gráfica sobre regras de escalonamento e otimização através de simulação utilizando o *software* SIMIO. Uma nova proposta foi desenvolvida, aumentando e melhorando a produção, através de um melhor planejamento e controle do fluxo dos processos de produção, reduzindo o tempo e eliminando custos.

Benedetto e Nikolay (2021) identificaram as principais características dos sistemas de custeio RKW e Sistema de custeio por Absorção, a fim de avaliar qual melhor atende os objetivos de formação dos custos de produtos com diferentes características, tanto técnicas quanto de processos, em uma determinada indústria gráfica.

Analizando os assuntos abordados nos trabalhos acima citados, esses se referem a outros assuntos tais como melhoria no processo de produção e gestão de forma geral, sejam eles por questões de fluxo e/ou layout dos processos, logística, trabalho por item ou por estoque, além de questões de sustentabilidade como redução e análise de resíduos e poluentes e até mesmo uma avaliação do equilíbrio corporal influenciado por ruídos de uma indústria gráfica.

Dessa forma, pode-se perceber que, mesmo direcionando as buscas para palavras relacionadas à otimização do consumo energético em uma indústria gráfica, os temas apresentados nas principais referências pesquisadas não abordaram diretamente o tema aqui proposto, o que justifica a proposição e execução deste trabalho.

No Capítulo 2 serão contextualizadas, de forma geral, as principais informações sobre a indústria gráfica, destacando-se as características principais dessa e de interesse do trabalho desenvolvido.

2. A Indústria Gráfica

O conceito de gráfica foi apresentado ao mundo em meados dos anos de 1430 por Johann Gutemberg, o qual utilizou um dispositivo capaz de reproduzir livros e jornais por meio de caracteres móveis. Nele encaixam-se os caracteres com letras e números esculpidos formando assim as frases. Tais caracteres se assemelham a um carimbo que transfere a tinta para o papel ou outro material que seja utilizado. Tal dispositivo ficou conhecido como Máquina Tipográfica ou Tipógrafo e é apresentado na Figura 1. Esta invenção foi dada como revolucionária, pois, nesta época todos os tipos de impressos que conhecemos hoje eram feitos à mão, como por exemplo, os livros e jornais.

A partir da invenção e utilização dos tipógrafos, foi possível a produção em alta escala de livros e jornais. Uma curiosidade se dá ao primeiro livro completo impresso com este mecanismo: a Bíblia Sagrada, redigida em um dialeto alemão, país onde Gutemberg nasceu.



Figura 1 – Exemplo de tipógrafo
Fonte: <http://herthamax.com.br/tag/tipografia/>

Atualmente, existem maquinários com muito mais tecnologia que os existentes no século XV. As máquinas tipográficas foram perdendo a força com o surgimento das impressoras *offset*, pois além da evolução tecnológica destes maquinários foi possível a automação dos processos de impressão.

2.1. Indústria gráfica no Brasil

O segmento gráfico no Brasil teve início em 1808 por meio de um decreto régio que oficializou a implantação da tipografia no país. Este fato aconteceu juntamente a chegada da família real portuguesa.

O primeiro jornal a ser publicado no Brasil foi a Gazeta do Rio de Janeiro. A partir disso vários outros materiais começaram a ser produzidos, tais como, trabalhos científicos, materiais didáticos e algumas obras literárias. Em 1922 a gráfica carioca *Companhia Lithographica Ferreira Pinto* adquire a primeira máquina de

offset do Brasil. No ano seguinte, um grupo de comerciantes e industriais gráficos fundaram a Associação dos Industriais e Comerciantes Gráficos de São Paulo.

A impressora *offset* chegou em São Paulo em 1924, pela gráfica *Editora Monteiro Lobato*, que mais tarde passou o equipamento à São Paulo Editora. Em 1928, o jornal *O Estado de São Paulo* lançou o primeiro suplemento impresso em rotogravura (impressão rotogravura é também conhecido como impressão em baixo relevo. Este processo utiliza matrizes cilíndricas de grande durabilidade e máquinas de impressão rotativa em alta velocidade). A Figura 2 apresenta o sistema de impressão em rotogravura.

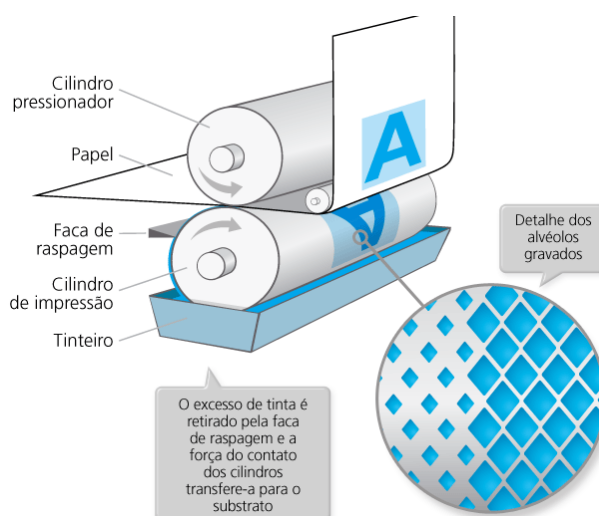


Figura 2 – Sistema da impressão em rotogravura.

Fonte: http://selosordinariosdobrasil.blogspot.com/p/blog-page_58.html

Com o surgimento das leis brasileiras, a Associação dos Industriais e Comerciantes Gráficos de São Paulo transforma-se no Sindicato dos Industriais e Comerciantes Gráficos de São Paulo (SINDIGRAF-SP), que mais tarde passou a ser reconhecido oficialmente por lei.

O modernismo nos equipamentos de impressão ocorreu apenas em 1950 com a Companhia Litográfica Ypiranga que instalou um moderníssimo equipamento para imprimir no Brasil o primeiro número da revista *Seleções* e em 1984 a indústria entra na era da informática.

2.2. Os números da Indústria Gráfica

Em Março de 2021 a ABIGRAF (Agencia Nacional das Indústrias Gráficas) divulgou os números oficiais do ano de 2020 desta área Gráfica. Estes dados mostram o quão importante é o setor, pois, além de gerar diversos empregos e impulsionar a economia, esses produtos geram negócios em outros ramos de atividades, tais como agências de publicidade e marketing e ainda editoriais. Estes ramos são responsáveis pela divulgação de fornecedores para os clientes. Na Figura 3, o gráfico ilustra o perfil das gráficas no Brasil onde nota-se que a maior parte é preenchida por empresas de micro e pequeno porte, o que mostra a importância em se conseguir cada vez mais a busca por técnicas de otimização para os processos internos e também no aperfeiçoamento do planejamento das operações.

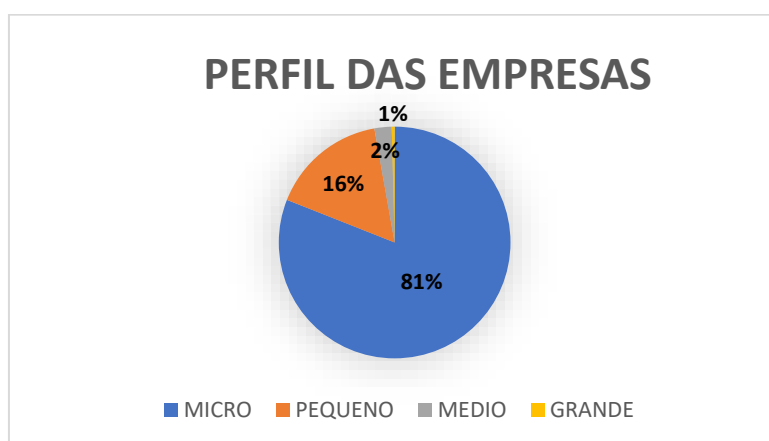


Figura 3 – Comparação dos portes das Indústrias Gráficas no Brasil
Fonte: ABIGRAF (2021)

Na Figura 4, o gráfico mostra a abrangência das indústrias gráficas no Brasil. Como pode-se observar, é evidente a importância econômica e social deste setor, tendo em vista a quantidade de trabalhadores empregados vs. região demográfica.

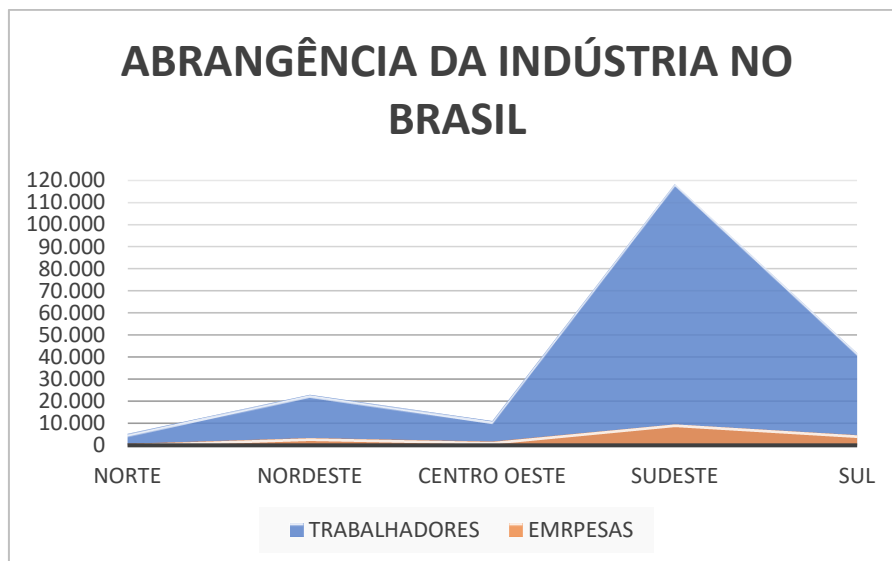


Figura 4 – Distribuição de empresas e funcionários por região
Fonte: ABIGRAF (2021)

As indústrias gráficas são responsáveis pela impressão de diversos produtos. Na Figura 5 o gráfico apresenta os segmentos da indústria gráfica no Brasil.

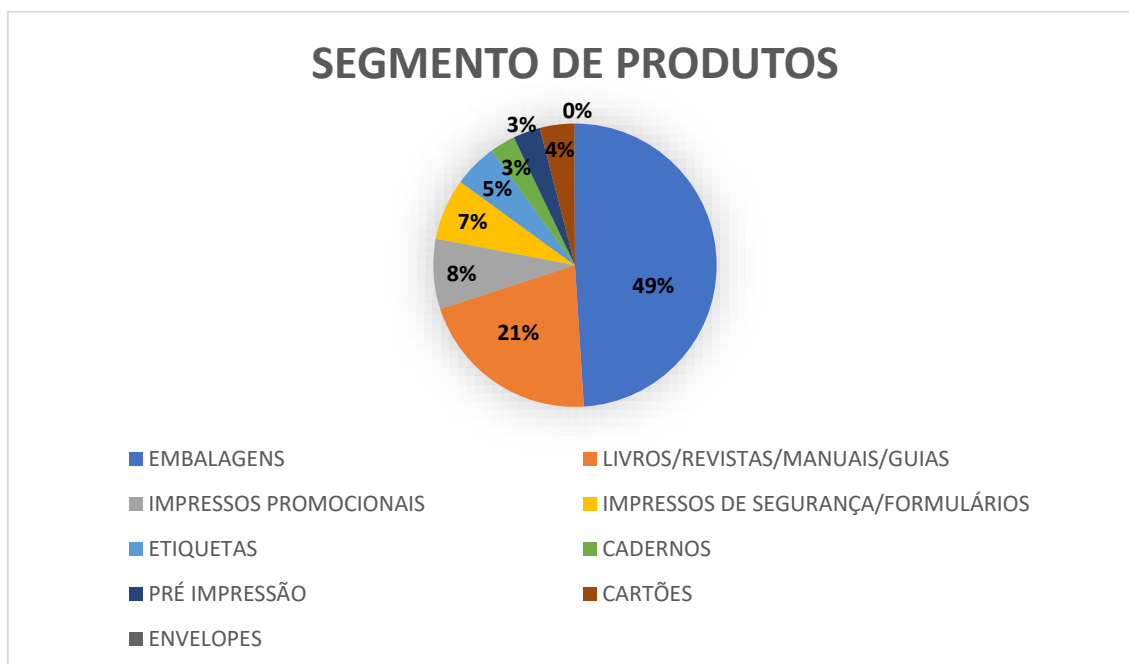


Figura 5 – Segmentos de produtos do setor gráfico no Brasil
Fonte: ABIGRAF (2021)

2.3. A Estrutura *Offset*

A impressão *offset* é o processo mais utilizado na atualidade na impressão comercial e isso se dá por conta da capacidade em imprimir com alta qualidade.

O sistema de impressão *offset* funciona de uma maneira chamada indireta, ou seja, a imagem é passada de um cilindro para o outro até chegar no papel. O processo *offset* utiliza o princípio de repulsão entre água e óleo. A seguir, os elementos que compõem a estrutura das máquinas de *offset* são apresentados.

2.3.1. Chapas

A Chapa de alumínio é o elemento que possui a imagem que será reproduzida durante o processo de impressão. A imagem é gravada na chapa através de um processo chamado CTP (Computer to Plate), sendo feita a laser. Após sua gravação, a chapa passa por outra máquina chamada reveladora que, com o uso de alguns agentes químicos, faz sua limpeza mantendo apenas o que deve ser absorvido pela tinta na hora da impressão.

No processo de impressão, a função da chapa é transferir a tinta para a Blanqueta. Na Figura 6 temos a chapa saindo da reveladora e na Figura 7 temos a chapa pronta para ser impressa.



Figura 6 – Gravação de chapa

Fonte: <https://www.grafittografica.com.br/producao-offset/>



Figura 7 – Chapa gravada

Fonte: <https://graficainterfill.files.wordpress.com/2013/12/cam00654.jpg>

A gravação acontece por meio da repulsão entre a água e o óleo contido nas tintas. Nesse processo as partes que foram gravadas a laser repelem a água/solvente e faz com que apenas a tinta consiga ficar presa na chapa.

2.3.2. Tintas

As Tintas utilizadas na impressão *offset* são fluidos de alta viscosidade que se distinguem em quatro padrões de cores:

Tintas escala ou Cromia: é a formação de cores no impresso através da utilização de 4 cores básicas, *cyan* (ciano), magenta, *yellow* (amarelo), *black* (preto). Estas cores básicas são chamadas de CMYK e um exemplo da composição delas é mostrada na Figura 8.

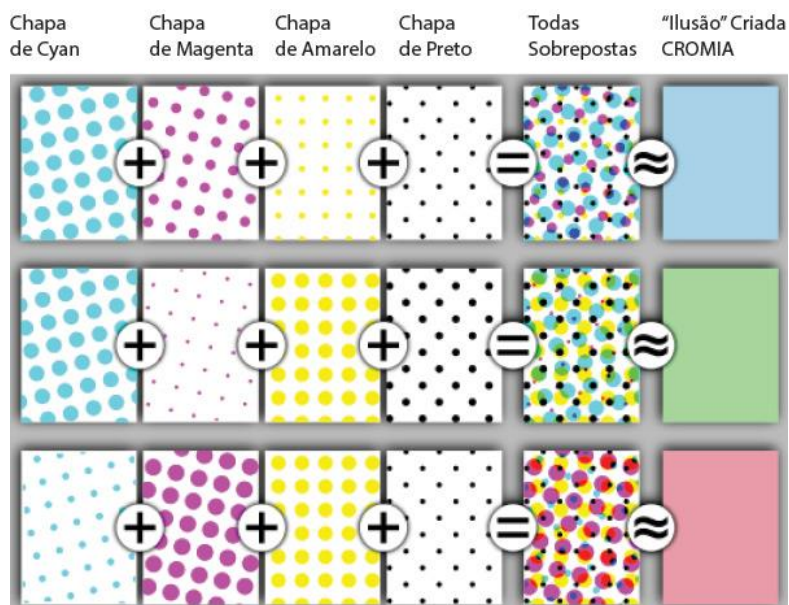


Figura 8 – Composição de cores (CMYK)

Fonte: <https://www.graficacriasett.com.br/o-que-e-cromia-cmyk/>

2.3.3. Substrato

O Substrato é o material que receberá a impressão. No caso do papel ele pode variar em inúmeros tipos e gramaturas (peso estimado no metro quadrado do papel). Os tipos mais comuns são:

- *Offset*
- *Couché*
- *Cartão*

2.3.4. Impressoras *Offset*

Os componentes principais de uma impressora *offset* são: mesa de alimentação, mesa de margeação, grupo impressor, mesa de recepção. Cada máquina tem uma quantidade de torres que varia de acordo com a especificação do modelo. A Figura 9 ilustra a estrutura geral e os componentes básicos de uma impressora *offset*:

- **Sistema de alimentação**
- **Mesa de Margeação**
- **Grupo Impressor**
- **Sistema de molha**

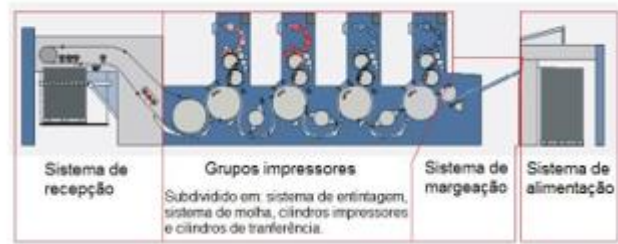


Figura 9 – Impressora *Offset*
 Fonte: <http://www.tecnologiagrafica.com.br>

Pela Figura 10, é possível observar que o sistema de molha é composto por uma banheira, que é o recipiente que armazena o solvente ou a água; um cilindro alimentador, responsável por transportar o líquido para o cilindro tomador; um cilindro tomador, que transporta o líquido para o cilindro distribuidor; um cilindro distribuidor que transporta o líquido para os rolos molhadores. Esses rolos são responsáveis pelo umedecimento das chapas.

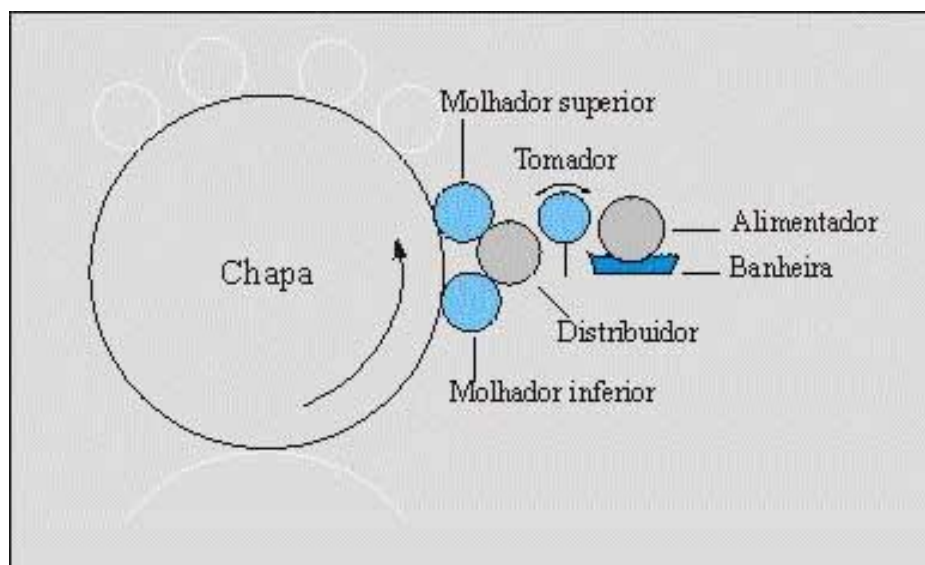


Figura 10 – Sistema de impressão
 Fonte: <http://www.tecnologiagrafica.com.br>

Na Figura 11 estão ilustrados os cilindros cujas responsabilidades são de fazer a transferência da tinta, do sistema de molha e da imagem a ser impressa para o papel.

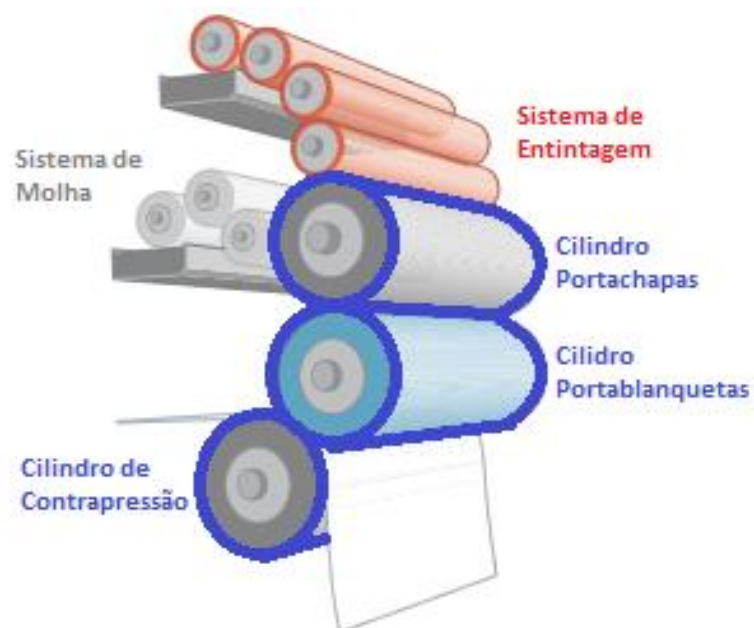


Figura 11 – Cilindros do conjunto impressor de uma Impressora *Offset*
 Fonte: <http://www.tecnologiagrafica.com.br>

Na Figura 13 temos a ilustração de uma remalina, que nada mais é que um filete lateral que pode ser destacado e tem a função de tracionar os formulários nas impressoras matriciais. Na Figura 12 a peça responsável pela furação destas remalinas.



Figura 12 - Cilindro de Tracionamento
 Fonte: <http://www.tecnologiagrafica.com.br>



Figura 13 - Remalinas

Fonte: <http://www.tecnologiagrafica.com.br>

Na Figura 14 encontra-se uma impressora *offset* rotativa de pequeno porte e é possível ver a bobina de papel em seu sistema de alimentação.



Figura 14 - Impressora *offset* rotativa

Fonte: <https://clube.design/2014/producao-grafica-3-maquinas-planas-ou-rotativas/>

Na Seção 2.4 são apresentadas as principais informações a serem consideradas para a formulação do modelo matemático auxiliar à otimização do PPCP de uma indústria gráfica, descrito na Seção 2.5, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica relativo à utilização de conjuntos distintos de máquinas de impressão e máquinas de acabamento dos itens comercializados por essa indústria, podendo levar em conta também a minimização do tempo de processamento.

2.4. *Workflow* da Indústria Gráfica

O *Workflow* da indústria gráfica representa o fluxo operacional desta, desde a captação e formação de uma carteira de pedidos de clientes e seus itens, criação das ordens de produção e posterior análise dos insumos

necessários da mesma pelo PPCP, bem como suas alocações nas máquinas impressoras e quando necessário nas máquinas de acabamento, para posteriormente serem expedidas aos clientes.

2.4.1. Captação de Clientes e itens

Todos os itens produzidos por uma indústria gráfica, passam por uma série de processos internos, antes de chegar finalmente aos clientes.

O primeiro passo é a captação feita através de vendedores, podendo estes ser internos que atuam através de telemarketing, ou externo onde é feita de forma presencial. Após isso, é feito um orçamento, em que se leva em conta todo o processo produtivo da indústria a fim de custear a produção de determinado item. Em seguida ocorre a negociação entre vendedores e clientes e, quando aprovado, é inserida uma ordem de produção referente ao item solicitado pelo cliente.

Os itens comercializados por uma indústria gráfica são bem diversificados, entre eles existem os formulários contínuos impressos ou sem impressão, utilizados na impressão de notas fiscais, ordem de serviços entre outros. Estes itens podem sofrer algum tipo de acabamento, quando o cliente exigir que este formulário tenha uma numeração sequencial, inclusão de serrilhas para destaque de recibos, ou canhotos.

2.4.2. Pré análise da Ordem de Produção e insumos necessários

Esta etapa é onde aparece a primeira atuação do PPCP. Com a ordem de produção em mãos, faz-se as análises de matérias primas necessárias para a produção deste item, e assim é possível estimar o tempo de produção e o prazo de entrega.

Nesta fase, acontece a interação entre vários setores da indústria, como por exemplo, o almoxarifado que analisa a disponibilidade de matérias primas em estoque solicitadas pelo PPCP, retornando a quantidade disponível para que seja realizada a compra de parte das matérias primas ou do total necessário para a produção desta ordem de produção.

O setor de compras formaliza com os fornecedores a reserva e compra das matérias primas, já envia ao setor financeiro para que eles programem o pagamento, e ao PPCP com a data prevista de disponibilidade destes materiais. Com isso o PPCP consegue estimar quando e por quanto tempo a ordem de produção ficará em processo de transformação dentro do parque produtivo. Para o modelo proposto no Capítulo 3 e os testes realizados, foi considerado que todos os itens estão com matérias primas, tais como papel e tintas, em estoque prontas para iniciar a produção.

2.4.3. Máquinas de impressão

No momento em que todo o material já está disponível em fábrica, é possível iniciar a produção das Ordens de Produção disponíveis.

Neste processo são utilizadas as denominadas máquinas de impressão, onde as matérias primas são alocadas e após os *setups* necessários elas se transformam em um produto com a personalização ou não dos clientes. Nela são configuradas as cores, posições de serrilhas, trocas de cilindros de impressão, tipos de acabamentos, dentre outras características do produto.

O processo de impressão precisa primeiramente obedecer a algumas regras básicas. Como existem impressoras diferentes neste parque gráfico, cada uma com sua respectiva tecnologia, consumo e velocidade diferentes entre si, não é aconselhado que um único item de um cliente seja processado em impressoras diferentes, além de outras questões de padrões técnicos, como serrilhas, furos de remalinas e quantidade de cores.

2.4.4. Máquinas de Acabamento

Após o material ser impresso, ou ter seu processo de impressão finalizado na máquina de impressão, o item que necessitar de algum tipo de acabamento será alocado nas máquinas do próximo processo, denominadas máquinas de acabamento.

Estes acabamentos podem ser variados, dentre eles podemos citar a numeração dos formulários, algum tipo de dobra, cortes especiais, dentre outros menos comuns.

Após este processo, o material poderá seguir para a expedição e assim ser transportado para os clientes.

Na Figura 15 é possível verificar o layout da fábrica e a disposição das máquinas de impressão (Imp) e de acabamento (Acab).

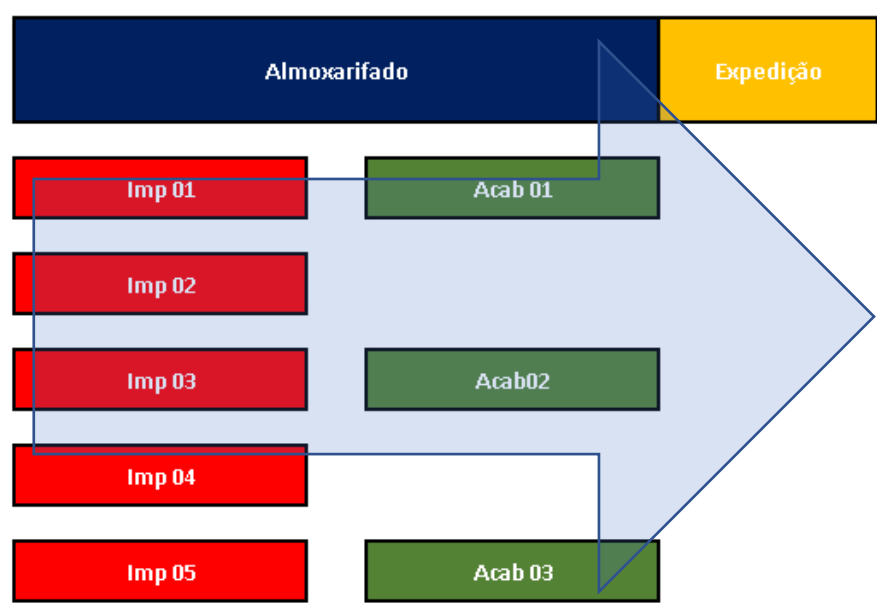


Figura 15 -Layout e disposição das máquinas
 Fonte: autoria própria

2.5. Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP)

É comum encontrar nas empresas que estão inseridas no setor industrial um departamento que atua em total integração entre os demais setores. Essa ação simultânea quando bem implantada têm muito a contribuir com a empresa.

O Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) mantém essa sinergia entre os diversos setores, desde o contato direto com o setor comercial e vendas, nas entradas de pedidos e geração das ordens de produção, nos estoques e compras, nas análises de insumos necessários na produção, na produção e programação de produção e ainda com o setor de expedição.

Segundo Vargas e Laugeni (2003), o PPCP é também um dos principais setores da indústria responsáveis pela tomada de decisão tendo como principal função o controle de recursos dentro do processo de produção dos itens e tem por finalidade transformar estes recursos de forma eficiente em bens e serviços.

Esse setor também é fundamental para o planejamento de curto, médio e longo prazo, pois trabalha desde o recebimento das ordens de produção providas dos pedidos de vendas, até sua análise, planejamento de como se desencadeará a produção, finalização e expedição do produto.

Tagliarenha et al. (2017) mostram que existe uma diferença entre os termos Planejamento e Programação que está relacionado ao horizonte de tempo sendo que o planejamento se aplica para médios e longos prazos enquanto a programação está ligada ao curto prazo.

O planejamento da produção procura definir antecipadamente o que e como fazer além de definir quando e quem fazer, a fim de obter a melhor eficiência em concomitância à eficácia do processo (Chiavenato, 2008).

Ainda, Favaretto (2001) menciona que a tomada de decisão é uma integração entre a gestão de produção e outras áreas funcionais da indústria como o setor de vendas e financeiro.

A programação da Produção é responsável por determinar os itens a serem produzidos pela empresa. Neste momento é determinado as quantidades que devem ser produzidas e a designação das máquinas, além das datas de início e fim, levando em consideração toda a carteira de pedidos e também a disponibilidade dos recursos para tal produção e por fim determinar a melhor estratégia de produção (Russomano, 1995).

Lustosa et al. (2008) apresentam uma subdivisão que devem nortear as decisões no que se diz respeito a Programação da Produção:

- Designação: onde as demandas serão produzidas.
- Sequenciamento: a ordem em que as tarefas devem seguir na produção
- Programação: determinar quando a tarefa será iniciada e terminada.
- Controle: acompanhar a sequência da programação para que ela seja seguida, e caso alguma eventual reprogramação/intervenção seja necessária.

Taglialha (2017) cita que o sequenciamento, corresponde à ordenação entre as diversas tarefas de um processo ou à ordem pela qual as tarefas serão processadas em uma determinada máquina.

Segundo LePape (2005) em alguns momentos podemos nos deparar com um problema de escalonamento, que consiste em decidir quando as demandas devem ser produzidas, mas levando em conta as restrições de prazo e recursos.

No Capítulo 3 é feita uma descrição do problema e proposto um modelo matemático para auxiliar o PPCP da indústria gráfica, visando a minimização de custos de consumo ou a minimização do tempo operacional de produção dos itens nas máquinas de impressão e máquinas de acabamento. Considerando a subdivisão apresentada por Lustosa et al. (2008), o modelo proposto é simplificado no sentido de apenas efetuar a designação dos itens às máquinas, enquanto os demais passos do processo, sequenciamento, programação e controle são realizados através de uma heurística para o ajustamento da produção apresentada na Seção 4.2 do Capítulo 4.

3. Problema de PPCP na Indústria Gráfica

O modelo matemático de designação proposto para auxiliar a resolução do problema de PPCP na produção de itens em uma indústria gráfica, visando a redução do custo com o consumo de energia elétrica ou a minimização do tempo operacional de produção dos itens, foi formulado a partir de informações fornecidas por uma indústria gráfica da cidade de Bauru. Através dessas, foi possível realizar uma escolha apropriada das máquinas a serem usadas para a confecção dos itens, considerando a capacidade de produção das máquinas de impressão e de acabamento, respeitando-se os tempos de *setup* e de operação dessas. Basicamente, o problema consiste em otimizar, através da designação dos itens às máquinas, o processo de produção em indústrias gráficas. Com a finalidade de um melhor planejamento da produção dos itens comercializados pela indústria, objetiva-se minimizar o custo de consumo de energia gasto ou o tempo operacional das máquinas de impressão e de acabamento, respeitando-se as restrições operacionais do problema relativa à designação dos itens às máquinas no horizonte de planejamento.

A seguir é feita a descrição do problema relacionado ao PPCP, a qual será considerada para a proposição do modelo a ser visto na Seção 3.2.

3.1. Descrição do problema relacionado ao PPCP

Para a proposição do modelo, uma breve introdução e discussão sobre esse é realizada. Para a tomada de decisão, antes de alocar os itens nas máquinas de impressão e máquinas de acabamento disponíveis na indústria, o PPCP leva em consideração alguns fatores presentes no processo produtivo, como por exemplo a disponibilidade de insumos (Papel, tintas, entre outros) e os prazos de entregas a serem cumpridos. No modelo proposto e resultados apresentados, esses fatores já serão considerados pré-definidos pela indústria. Ressalta-se também que a indústria gráfica considerada não trabalha com estoque de itens em seu horizonte de planejamento da produção.

O modelo objetiva minimizar o custo de consumo energético ou o tempo operacional de produção dos itens nas máquinas de impressão e de acabamento considerando: a carteira de itens a serem produzidos para os clientes – demanda dos clientes e os dados das máquinas fornecidos pela indústria gráfica, tais como os tempos médios de *setup*, as velocidades de processamento e respectivos consumos energéticos.

Observa-se que todos os itens a serem produzidos passam necessariamente pelas máquinas de impressão e que nem todos os itens a serem produzidos requerem acabamento.

Devido ao fato dos maquinários de impressão e de acabamento terem custos de consumo e manutenção altos, o trabalho propõe um modelo que visa otimizar a utilização desses, a fim de reduzir o gasto com o consumo de energia durante o tempo em que as máquinas estiverem em operação. Pode otimizar também o tempo

operacional de produção de itens, caso a indústria queira acelerar o processo de produção para a finalização e entrega desses.

Inicialmente considera-se como limite de tempo de processamento dos itens nas máquinas de impressão e de acabamento, o tempo total relativo ao horizonte de planejamento necessário ao setor de PPCP, para a produção dos itens nas máquinas. Assim, o modelo proposto para auxiliar na otimização do PPCP tem o objetivo de realizar a melhor designação dos itens às máquinas no horizonte de planejamento e auxiliar no processo de produção. De fato, esse é simplificado quando, somente irá considerar as demais subdivisões do PPCP em uma análise posterior denominada de heurística para o ajustamento da produção.

Na Seção 3.2 é indicada a notação utilizada e a formulação do modelo matemático proposto, o qual insere-se em um problema de designação (ver Apêndice A), visando auxiliar a otimização do PPCP.

3.2. Modelo Matemático

A seguir são indicados os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão para a formulação do modelo proposto.

Índices:

I :	índice associado aos tipos de itens a serem produzidos;
m :	índice associado às máquinas de impressão;
n :	índice associado às máquinas de acabamento;
M :	número total de máquinas de impressão;
N :	número total de máquinas de acabamento;
I :	número total de itens a serem produzidos;
F :	número total de itens que requerem impressão e acabamento.

Conjuntos:

$V_M = \{1, \dots, M\}$:	conjunto de máquinas de impressão;
$V_N = \{1, \dots, N\}$:	conjunto de máquinas de acabamento;
$V_F = \{1, \dots, F\}$:	conjunto de itens que requerem impressão e acabamento para serem finalizados;
$V_I = \{1, \dots, F, \dots, I\}$:	conjunto total de itens a serem produzidos, sendo que todos passam pela máquina de impressão e somente os itens $i \in V_F$ passam pelas máquinas de acabamento.

Parâmetros:

c :	custo unitário do kWh , fornecido pela concessionária de energia;
kp_m :	consumo energético em kWh da máquina de impressão m ;
kf_n :	consumo energético em kWh da máquina de acabamento n ;
cp_m :	custo do consumo de energia da máquina de impressão m ($c.kp_m$);

cf_n :	custo do consumo de energia da máquina de acabamento n ($c.kf_n$);
c_i :	comprimento total do item i , em metros;
v_m :	velocidade de operação da máquina de impressão m , em metros/minuto;
v_n :	velocidade de operação da máquina de acabamento n , em metros/minuto;
TP_{im} :	tempo de impressão por metro do item i na máquina de impressão m ($1/v_m$);
TF_{in} :	tempo de produção por metro do item i na máquina de acabamento n ($1/v_n$);
T_m :	tempo máximo de operação da máquina de impressão m , em minutos, definido pelo horizonte de planejamento (turnos x 10 horas);
T_n :	tempo máximo de operação da máquina de acabamento n , em minutos, definido pelo horizonte de planejamento (turnos x 10 horas);
AP_{im} :	tempo médio de <i>setup</i> do item i na máquina de impressão m ;
AF_{in} :	tempo médio de <i>setup</i> do item i na máquina de acabamento n .

Parâmetros novos:

G :	número suficientemente grande;
D_i :	demanda, em metros, do item i .

Variáveis de decisão:

z_{im} :	quantidade (em metros) a ser impressa do item i na máquina de impressão m ;
w_{in} :	quantidade (em metros) a ser acabada do item i na máquina de acabamento n ($i \in V_F$).
$x_{im} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } i \text{ é designado à máquina de impressão } m; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$	
$y_{in} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } i \text{ é designado à máquina de acabamento } n; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$	

Modelo Matemático:

$$\text{Minimizar } \sum_{m \in V_M} \sum_{i \in V_I} cp_m (TP_{im} z_{im} + AP_{im} x_{im}) + \sum_{n \in V_N} \sum_{i \in V_F} cf_n (TF_{in} w_{in} + AF_{in} y_{in}) \quad (1)$$

Sujeito a:

Restrições de Capacidade:

$$\sum_{i \in V_I} TP_{im} z_{im} + AP_m x_{im} \leq T_m \quad m \in V_M; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V_F} TF_{in} w_{in} + AF_n y_{in} \leq T_n \quad n \in V_N; \quad (3)$$

Restrições de atendimento à demanda:

$$\sum_{m \in V_M} z_{im} = D_i \quad i \in V_I; \quad (4)$$

$$\sum_{n \in V_N} w_{in} = D_i \quad i \in V_F; \quad (5)$$

Restrições de preparação (setup):

$$z_{im} \leq Gx_{im} \quad i \in V_I; m \in V_M; \quad (6)$$

$$w_{in} \leq Gy_{in} \quad i \in V_F; n \in V_N; \quad (7)$$

Restrições de designação:

$$\sum_{i \in V_I} x_{im} \geq 1 \quad m \in V_M; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in V_F} y_{in} \geq 1 \quad n \in V_N; \quad (9)$$

$$\sum_{m \in V_M} x_{im} = 1 \quad i \in V_I; \quad (10)$$

$$\sum_{n \in V_N} y_{in} = 1 \quad i \in V_F; \quad (11)$$

Variáveis de decisão:

$$z_{im} \in Z_+; \quad i \in V_I; m \in V_M; \quad (12)$$

$$w_{in} \in Z_+; \quad i \in V_F; n \in V_N; \quad (13)$$

$$x_{im} \in \{0,1\}; \quad i \in V_I; m \in V_M; \quad (14)$$

$$y_{in} \in \{0,1\}; \quad i \in V_F; n \in V_N; \quad (15)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo com o consumo de energia para a produção dos itens demandados, considerando as máquinas de impressão e as máquinas de acabamento, levando em conta o tempo de preparação (*setup*) das máquinas e de produção dos itens.

As restrições (2) garantem que a capacidade de cada máquina de impressão no horizonte de planejamento seja respeitada. Da mesma forma, as restrições (3) asseguram que o tempo utilizado em cada máquina de acabamento durante o horizonte de planejamento respeite sua capacidade disponível.

As restrições (4) e (5) garantem o atendimento da demanda de cada item no horizonte de planejamento considerado, respectivamente, nas máquinas de impressão e acabamento.

O conjunto de restrições (6) relacionam as variáveis de produção e de designação associadas às máquinas de impressão. Haverá impressão do item i na máquina m somente se o item i for designado para a máquina m . Similarmente, as restrições (7) relacionam as variáveis de produção e de designação associadas às máquinas de acabamento. Nestas restrições G é um número grande cujo menor valor pode ser definido como $\text{Máximo}\{D_i, i \in V_I\}$.

Em (8)-(11) estão as restrições de designação. As restrições (8) garantem que cada máquina de impressão receba pelo menos um item durante o horizonte de planejamento. O mesmo ocorre com cada máquina de acabamento, nas restrições (9). As restrições (10) asseguram que cada item seja designado a uma única máquina de impressão. Da mesma forma, as restrições (11) garantem que cada item que precisa de acabamento seja designado a uma única máquina de acabamento. Estas restrições garantem que, pelo menos um item seja designado às máquinas de impressão, bem como às máquinas de acabamento.

Por fim, as restrições (12)-(15) definem as variáveis de decisão em seus respectivos domínios.

O modelo (1)-(15), que visa minimizar o custo do consumo de energia para a produção dos itens, pode ser redefinido substituindo-se a função objetivo (1) pela expressão (16), a qual visa minimizar o tempo operacional das máquinas para a produção dos itens:

$$\text{Minimizar } \sum_{m \in V_M} \sum_{i \in V_I} (TP_{im}z_{im} + AP_{im}x_{im}) + \sum_{n \in V_N} \sum_{i \in V_F} (TF_{in}w_{in} + AF_{in}y_{in}) \quad (16)$$

Em relação ao modelo (1)-(15) apresentado, faz-se as seguintes observações:

- i. As restrições (4) e (5) estão na igualdade, pois se forem consideradas na desigualdade (menor ou igual), como o problema é de minimização ele atribuirá às variáveis z_{im} e w_{in} o valor nulo e não tem no modelo outra restrição que garanta que a demanda seja produzida e atendida;
- ii. As restrições (8) e (9) devem estar no modelo somente se tiver que atender a condição de que todas as máquinas devem ser utilizadas, produzindo pelo menos um item. Caso contrário, elas se tornam redundantes, ou seja maiores ou iguais a zero.

Posteriormente à designação feita e condicionada a essa no horizonte de planejamento, este é dividido em turnos de produção e uma programação da produção dos itens nesses turnos é realizada. Esse ajustamento periódico da produção é denominado de heurística de ajustamento de produção, o qual será considerado no próximo Capítulo, na Seção 4.2.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados do modelo implementado, levando em consideração alguns estudos de caso baseados em carteiras de pedidos contendo a demanda de cada cliente e as duas funções objetivos definidas, (1) ou (16). Inicialmente, considera-se o modelo proposto para fazer a designação dos itens da carteira de pedidos às máquinas de impressão e de acabamento, para posteriormente realizar uma heurística de ajustamento de produção e ajustar a confecção dos itens em turnos de produção, considerando a definição de Lustosa et al. (2008).

4. Testes computacionais - Estudos de caso

Para verificar o desempenho do modelo proposto, estudos de caso são realizados com dados fornecidos por uma indústria gráfica sediada na cidade de Bauru-SP afim de atestar a o funcionamento do modelo. As instâncias utilizadas para os testes numéricos foram obtidas a partir de 3 carteiras de pedidos que já estavam em programação na produção. O horizonte de planejamento considerado para esses casos é determinado por turnos de trabalho, com um total de 8 horas diárias podendo ser estendidas em no máximo 2 horas diárias no tempo operacional das máquinas.

O modelo matemático (1) - (15) foi implementado na plataforma GAMS versão 34.3.0 através do *solver* CPLEX versão 12.10.0.0, sendo executado em um computador Dell com processador Intel® Core™ i5 com 4GB de memória RAM. A partir de dados fornecidos pela indústria, na Tabela 2 estão as características gerais das máquinas disponíveis em seu parque gráfico, entre elas, os tipos de máquinas de impressão (Imp), em um total de 5 máquinas ou máquinas de acabamento (Acab), em um total de 3 máquinas, as respectivas velocidades de trabalho destas (metro/hora), tempos médios de *setup* (horas) das máquinas de impressão e de acabamento e consumo destas (kW/h).

Tabela 2 - Dados técnicos dos maquinários da indústria gráfica

Máquinas	Velocidade (metro/h)	Setup (h)	Consumo (kW/h)
Imp01	10.500	0,25	40
Imp02	3.000	0,50	112
Imp03	7.800	0,33	49,2
Imp04	12.600	0,17	24
Imp05	9.000	0,25	2,2
Acab01	7.800	0,50	40
Acab02	12.000	0,75	112
Acab03	10.800	0,75	50

As carteiras de pedidos contendo os itens solicitados pelos clientes (Carteira I, II e III), com as respectivas demandas (D_i) dos itens quantificadas (Qtd) em metros (m) são apresentadas nas Tabelas 3, 4 e 5.

Entre as demandas de itens apresentadas, necessitam de acabamento, respectivamente, na Tabela 3 as indicadas de D01 à D05, na Tabela 4, de D01 à D10 e na Tabela 5, de D01 à D35.

Tabela 3 – Carteira I de itens de clientes

Demanda	Qtd (m)
D01	15.000
D02	20.000
D03	55.000
D04	85.000
D05	50.000
D06	60.000
D07	70.000
D08	80.000
D09	90.000
D10	18.000

Tabela 4 – Carteira II de itens de clientes

Demanda	Qtd (m)	Demanda	Qtd (m)
D01	15.000	D11	13.000
D02	20.000	D12	28.000
D03	55.000	D13	59.000
D04	85.000	D14	82.000
D05	50.000	D15	55.000
D06	60.000	D16	61.000
D07	70.000	D17	77.000
D08	80.000	D18	84.000
D09	90.000	D19	91.000
D10	18.000	D20	70.000

Tabela 5 – Carteira III de itens de clientes

Demanda	Qtd (m)	Demanda	Qtd (m)	Demanda	Qtd (m)	Demanda	Qtd (m)	Demanda	Qtd (m)
D01	15.000	D11	13.000	D21	77.000	D31	17.000	D41	55.000
D02	20.000	D12	28.000	D22	54.000	D32	46.000	D42	67.000
D03	55.000	D13	59.000	D23	10.000	D33	98.000	D43	43.000
D04	85.000	D14	82.000	D24	13.000	D34	78.000	D44	45.000
D05	50.000	D15	55.000	D25	67.000	D35	11.000	D45	12.000
D06	60.000	D16	61.000	D26	35.000	D36	98.000	D46	17.000
D07	70.000	D17	77.000	D27	12.000	D37	45.000	D47	74.000
D08	80.000	D18	84.000	D28	98.000	D38	85.000	D48	33.000
D09	90.000	D19	91.000	D29	43.000	D39	35.000	D49	42.000
D10	18.000	D20	70.000	D30	40.000	D40	27.000	D50	17.000

O valor do custo de energia elétrica fornecido pela concessionária de energia é de R\$ 0,86/kwh durante seu horário de funcionamento fora do chamado horário de pico, o qual é o valor considerado para c .

Com os dados apresentados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 obteve-se os resultados de quais máquinas de impressão e de acabamento deveriam estar ativas para a minimização do custo de consumo de energia das máquinas, a partir do tempo de processamento dessas para o atendimento da produção das demandas dos clientes.

Além de mostrar o resultado da minimização do custo do consumo de energia, o modelo (1)-(15) também permite operar com a minimização do tempo operacional, quando a função objetivo (1) é substituída pela função objetivo (16).

Serão apresentados na Seção 4.1 os resultados obtidos considerando as três carteiras de pedidos vistas nas Tabelas 3 a 5, relativas à designação de máquinas definidas pelo modelo proposto com as duas funções objetivo e ao final um comparativo entre eles.

4.1. Resultados obtidos com a minimização do custo de consumo ou do tempo operacional.

4.1.1. Carteira de Pedidos I – 10 itens

Os resultados obtidos com a resolução do modelo (1)-(15), que objetiva a minimização do custo de consumo através da designação de itens às máquinas, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, são apresentados nas Tabelas 6 e 7. A Tabela 6 mostra quais máquinas devem estar ativas ‘1’ ou inativas ‘0’ para a produção dos itens contidos na Carteiras I de pedidos, visando o menor custo de consumo de energia (R\$) com os respectivos itens designados em cada uma das máquinas de impressão e de acabamento, no horizonte de planejamento.

Tabela 6 – Distribuição dos itens por máquinas (menor custo de consumo).

	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10
Imp01	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Imp02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imp03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Imp04	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
Imp05	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
Acab01	0	1	0	0	0	-	-	-	-	-
Acab02	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-
Acab03	0	0	1	1	1	-	-	-	-	-

Na Tabela 7 são apresentados os tempos em que as máquinas de impressão e máquinas de acabamento estiveram em operação para a confecção de todos os itens, bem como o número de itens alocados e as demandas alocadas (designadas) em cada uma das máquinas, com o objetivo do menor custo de consumo. Apresenta também o tempo total (horas), o consumo total de energia (KWh) e o custo total (R\$) para a produção desta carteira de pedidos.

Nos tempos apresentados já estão sendo contemplados os *setups* necessários de cada uma das máquinas.

Tabela 7 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (menor custo de consumo).

	Tempo de Operação (horas)	Itens Alocados (unidades)	Demandas alocadas
Imp01	10,02	2	D02, D08
Imp02	5,5	1	D01
Imp03	2,26	1	D10
Imp04	19,32	4	D03, D05, D06, D07
Imp05	19,94	2	D04, D09
Acab01	3,06	1	D02
Acab02	2	1	D01
Acab03	19,84	3	D03, D04, D05
Tempo Total (h)	81,94		
Consumo Total (kWh)	2.973,94		
Custo Total (R\$)	2.557,59		

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 0,141 segundos.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir do modelo proposto no Capítulo 3, levando em consideração a expressão (16), que visa minimizar o tempo operacional de produção.

Considerando os dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, os resultados da minimização do tempo operacional de produção são apresentados nas Tabelas 8 e 9. A Tabela 8 mostra quais máquinas devem estar ativas ‘1’ ou inativas ‘0’ para a produção dos itens contidos na Carteiras I de pedidos, visando o menor tempo operacional de produção (horas) com os respectivos itens designados em cada uma das máquinas de impressão e de acabamento no horizonte de planejamento.

Tabela 8 – Distribuição dos itens por máquinas (menor tempo operacional).

	D01	D02	D03	D04	D05	D06	D07	D08	D09	D10
Imp01	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
Imp02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Imp03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Imp04	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
Imp05	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Acab01	1	0	0	0	0	-	-	-	-	-
Acab02	0	0	1	1	1	-	-	-	-	-
Acab03	0	1	0	0	0	-	-	-	-	-

Na Tabela 9 são vistos os tempos que cada uma das máquinas de impressão e máquinas de acabamento estiveram em operação, bem como o número de itens alocados e as demandas alocadas (designadas) em cada uma das máquinas, com o objetivo do menor tempo operacional. Apresenta também o tempo total (horas), o consumo total de energia (KWh) e o custo total (R\$) para a produção desta carteira de pedidos.

Os tempos apresentados já contemplam o *setup* necessário de cada uma delas.

Tabela 9 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (menor tempo operacional)

	Tempo de Operação (horas)	Itens Alocados (unidades)	Demandas alocadas
Imp01	19,8	3	D05, D06, D09
Imp02	5,5	1	D01
Imp03	2,26	1	D10
Imp04	19,71	4	D02, D03, D04, D08
Imp05	8,03	1	D07
Acab01	2,42	1	D01
Acab02	18,08	3	D03, D04, D05
Acab03	2,6	1	D02
Tempo Total (h)	78,4		
Consumo Total (kWh)	4.261,65		
Custo Total (R\$)	3.665,03		

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 0,156 segundos.

4.1.2. Carteira de Pedidos II – 20 itens

Os resultados obtidos com a resolução do modelo (1)-(15), que objetiva a minimização do custo de consumo através da designação de itens às máquinas, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 4, são apresentados na Tabela 10. Nela estão apresentados os tempos em que cada uma das máquinas de impressão e máquinas de acabamento estiveram em operação para a confecção de todos os itens, bem como o número de itens alocados em cada máquina e as respectivas demandas (itens) alocadas (que tiveram designação “1” na execução do modelo) em cada uma das máquinas, com o objetivo do menor custo de consumo. Nos tempos apresentados já estão sendo contemplados os *setups* necessários de cada uma das máquinas. Também é possível verificar na mesma Tabela o tempo total (horas), o consumo total de energia (kWh) e o custo total (R\$) para a produção desta carteira de pedidos.

Tabela 10 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (menor custo de consumo).

	Tempo de Operação (horas)	Itens Alocados (unidades)	Demandas alocadas
Imp01	29,95	4	D07, D14, D16, D19
Imp02	4,83	1	D11
Imp03	22,46	2	D08, D09
Imp04	29,99	9	D02, D03, D05, D06, D10, D12, D13, D15, D20
Imp05	30	4	D01, D04, D17, D18
Acab01	29,42	5	D01, D02, D03, D05, D07
Acab02	5,75	1	D06
Acab03	28	4	D04, D08, D09, D10
Tempo Total (h)	180,4		
Consumo Total (kWh)	6.850,55		
Custo Total (R\$)	5.891,47		

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 10,25 segundos.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir do modelo proposto no Capítulo 3, levando em consideração a expressão (16), que visa minimizar o tempo operacional de produção.

Considerando os dados apresentados nas Tabelas 2 e 4, os resultados da minimização do tempo operacional de produção são apresentados na Tabelas 11, que mostra os tempos em que cada uma das máquinas

de impressão e máquinas de acabamento estiveram em operação, bem como o número de itens alocados em cada máquina e as respectivas demandas (itens) alocadas (que tiveram designação “1” na execução do modelo) em cada uma das máquinas, com o objetivo do menor tempo operacional. Apresenta também o tempo total (horas), o consumo total de energia (kWh) e o custo total (R\$) para a produção desta carteira de pedidos.

Os tempos apresentados já contemplam o *setup* necessário de cada uma delas.

Tabela 11 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (menor tempo operacional)

	Tempo de Operação (horas)	Itens Alocados (unidades)	Demandas alocadas
Imp01	29,95	4	D07, D14, D16, D19
Imp02	4,83	1	D11
Imp03	22,46	2	D08, D09
Imp04	29,99	9	D02, D03, D05, D06, D10, D12, D13, D15, D20
Imp05	30	4	D01, D04, D17, D18
Acab01	8,19	1	D06
Acab02	30	5	D01, D05, D07, D08, D09
Acab03	18,28	4	D02, D03, D04, D10
Tempo Total (h)	173,7		
Consumo Total (kWh)	8.231,352		
Custo Total (R\$)	7.078,96		

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 3,734 segundos.

4.1.3. Carteira de Pedidos III – 50 itens

Os resultados obtidos com a resolução do modelo (1)-(15), que objetiva a minimização do custo de consumo através da designação de itens às máquinas, a partir dos dados apresentados nas Tabelas 2 e 5, são apresentados na Tabela 12. Nela são apresentados os tempos em que as máquinas de impressão e máquinas de acabamento estiveram em operação para a confecção de todos os itens, bem como o número de itens alocados em cada máquina e as respectivas demandas (itens) alocadas (que tiveram designação “1” na execução do modelo) em cada uma das máquinas, com o objetivo do menor custo de consumo. Apresenta também o tempo total (horas), o consumo total de energia (kWh) e o custo total (R\$) para a produção desta carteira de pedidos. Nos tempos apresentados já estão sendo contemplados os *setups* necessários de cada uma das máquinas.

Tabela 12 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (menor custo de consumo).

	Tempo Operação (horas)	Itens Alocados (unidades)	Demandas alocadas
Imp01	64,00	8	D14, D18, D19, D20, D33, D36, D38, D43;
Imp02	3,80	1	D23;
Imp03	1,74	1	D35;
Imp04	89,98	28	D01, D02, D03, D05, D10, D11, D12, D13, D15, D16, D22, D24, D26, D28, D29, D31, D32, D37, D39, D40, D41, D42, D44, D45, D46, D48, D49, D50;
Imp05	90,00	12	D04, D06, D07, D08, D09, D17, D21, D25, D27, D30, D34, D47;
Acab01	90,00	20	D01, D02, D03, D05, D10, D11, D12, D14, D15, D16, D17, D23, D24, D26, D27, D29, D30, D31, D32, D35;
Acab02	32,58	3	D19, D28, D33;
Acab03	89,92	12	D04, D06, D07, D08, D09, D13, D18, D20, D21, D22, D25, D34;
Tempo Total (h)	462,02		
Consumo Total (kWh)	17.177,05		
Custo Total (R\$)	14.772,26		

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 1,641 segundos.

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir do modelo proposto no Capítulo 3, levando em consideração a expressão (16), que visa minimizar o tempo operacional de produção.

Considerando os dados apresentados nas Tabelas 2 e 5, os resultados da minimização do tempo operacional de produção são apresentados na Tabela 13 onde podemos ver os tempos de cada uma das máquinas de impressão e máquinas de acabamento estiveram em operação, bem como o número de itens alocados em cada máquina e as respectivas demandas (itens) alocadas (que tiveram designação “1” na execução do modelo) em cada uma das máquinas, com o objetivo do menor tempo operacional. Apresenta também o tempo total (horas), o consumo total de energia (kWh) e o custo total (R\$) para a produção desta carteira de pedidos.

Os tempos apresentados já contemplam o *setup* necessário de cada uma delas.

Tabela 13 – Tempos de operação por máquinas, tempo operacional e custo de consumo de energia (menor tempo operacional)

	Tempo Operação (horas)	Itens Alocados (unidades)	Demandas alocadas
Imp01	89,89	11	D08, D09, D18, D19, D20, D28, D34, D36, D38, D42, D47;
Imp02	3,83	1	D23;
Imp03	0,33	1	D30;
Imp04	90,00	30	D01, D02, D03, D05, D10, D11, D12, D13, D15, D16, D22, D24, D25, D26, D27, D29, D31, D32, D33, D35, D37, D39, D40, D41, D44, D45, D46, D48, D49, D50;
Imp05	53,63	7	D04, D06, D07, D14, D17, D21, D43;
Acab01	10,56	6	D11, D17, D23, D24, D27, D35;
Acab02	90,00	11	D04, D08, D14, D16, D18, D19, D20, D21, D28, D33, D34;
Acab03	89,61	18	D01, D02, D03, D05, D06, D07, 09, D10, D12, D13, D15, D22, D25, D26, D29, D30, D31, D32;
Tempo Total (h)	427,85		
Consumo Total (kWh)	21.301,68		
Custo Total (R\$)	R\$18.319,45		

O tempo computacional para a execução do modelo foi de 0,281 segundos.

Através de comparações feitas dos resultados apresentados nas Tabelas 6 a 13, pode-se perceber que as quantidades de demandas (itens) foram alocadas da seguinte maneira:

Nas Tabelas 7, 10 e 12 os itens aparecem distribuídos em maior número nas máquinas Impressoras 1, 4 e 5 e Acabamento 1 e 3 pois são as máquinas com o menor consumo energético entre elas, enquanto nas Tabelas 9, 11 e 13 os itens aparecem distribuídos também em maior número nas máquinas Impressoras 1, 4 e 5 e Acabamento 2 e 3 pois são as máquinas com maiores velocidades de operação.

Com os resultados obtidos é possível comparar a relação custo de consumo de produção *vs.* tempo operacional. Observa-se nas Tabelas 7, 10 e 12, em que o custo de consumo é minimizado, que o número de horas obtido para o tempo operacional é maior em relação ao resultado obtido nas Tabelas 9, 11 e 13, quando se considerou a minimização desse tempo. E da mesma forma, quando o modelo minimizou o tempo operacional, foi obtido um custo de consumo maior nas Tabelas 9, 11 e 13 comparados ao resultado obtido nas Tabelas 7, 10 e 12. Assim, os resultados obtidos em relação ao modelo com a função objetivo (1) ou com a função objetivo (16), sujeito às restrições operacionais (2)-(15), possibilitaria traçar a curva *trade-off* de custo de consumo *vs.* tempo operacional, desde que (1) e (16) são objetivos conflitantes. Com esses dois objetivos poderia ser definido um modelo multi-objetivo e resolvê-lo através de métodos de otimização multiobjetivo para traçar esta curva, o qual não será considerado neste trabalho.

4.2 Heurística para o ajustamento da produção

Após a designação feita e condicionada a essa, uma análise posterior, denominada de heurística para o ajustamento da produção, é realizada nessa seção para a tomada de decisão do PPCP, visando um ajustamento periódico da produção que objetiva sequenciar, programar e controlar a confecção dos itens no horizonte de planejamento, levando em consideração que esse horizonte é dividido em turnos de produção. O turno de produção considerado pode ser: i) diário, com tempo de operação de oito horas com possibilidade de estender em no máximo duas horas-extras, limitando o turno em dez horas; ii) semanal, com tempo de operação de 80 horas (8 horas/dia) com possibilidade de estender em no máximo 10 horas-extras (2 horas/dia); iii) mensal, com tempo de operação de 320 horas (4 semanas) com possibilidade de estender em no máximo 40 horas-extras (10 horas/semana).

A heurística para o ajustamento da produção a ser considerada para a realização da programação diária de produção, já considera a designação dos itens às máquinas definidas pelo modelo apresentado no Capítulo 3 cujos resultados para o horizonte de planejamento encontram-se na Seção 4.1 nas Tabelas 7 a 13. Essa será feita considerando a função objetivo (1) com os resultados apresentados nas Tabelas 7, 10 e 12, bem como para a função objetivo (16), com os resultados apresentados nas Tabelas 9, 11 e 13.

O sequenciamento, a programação e o controle da produção dos itens às máquinas, em seus respectivos turnos, é realizada considerando os seguintes passos:

1. Os itens que necessitam de acabamento devem ser designados primeiro nas máquinas de impressão para em seguida seguirem para a máquina de acabamento;
2. Visando obter-se um menor tempo de ociosidade das máquinas de acabamento, os itens que necessitam o menor tempo de produção deverão ser alocados prioritariamente nas máquinas de impressão, para imediatamente serem designados às máquinas de acabamento, definidas na

Tabela 3 quando se considera a função objetivo (1) relativa à minimização do custo do consumo de energia, ou definidas na Tabela 5 quando se considera a função objetivo (10) relativa à minimização do tempo operacional da produção;

3. O tempo de operação diária das máquinas de impressão e de acabamento não deve ultrapassar o turno diário de dez horas, sendo oito horas do turno incluindo possíveis duas horas extras;

4. Os itens que não forem finalizados em um turno deverão ser inicializados no turno seguinte na mesma máquina. Caso o item seja finalizado ao final do turno (sem a necessidade de horas-extras), o próximo item designado nessa máquina terá sua produção iniciada no turno seguinte. E quando os itens não forem finalizados dentro do horizonte de planejamento, ele será automaticamente alocado no próximo horizonte.

Os passos definidos de 1 a 4, juntamente aos resultados obtidos nas Tabelas 7, 10 e 12, que visa a minimização do custo de consumo, foram considerados para o planejamento dos itens a serem produzidos no horizonte de planejamento. São representados nos Diagramas de Gantt vistos nas Figuras 16 a 21, um possível ajustamento para a produção, realizado de acordo com os passos propostos considerando a designação de máquinas de impressão e acabamento apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 7, 10 e 12. Nas Figuras 16 a 18 estão ilustrados os resultados obtidos com o menor custo operacional e a partir da Figura 19 à 21 os resultados de tempo operacional. Na representação o tempo de operação é aproximado ao real por considerar horas inteiras utilizando o decimal 0,5 como critério de arredondamento, ou seja, se por exemplo o tempo de produção ficar entre 4,1 a 4,4 horas, será arredondado para 4 horas e se o tempo de produção for de 4,5 a 4,9 horas será arredondado para 5 horas

Na Figura 16 evidencia-se o resultado obtido na Tabela 7, relativa à Carteira I e à minimização do custo de consumo, onde pode ser visto dois itens na Máquina de Impressão 01, apenas um item nas Máquinas de Impressão 02, 03 e Máquinas de Acabamento 01 e 02, dois itens na Máquina de Impressão 05, além de quatro itens na Máquina de Impressão 04 e três itens na Máquina de Acabamento 03.

A produção da carteira I foi finalizada em um total de 83 horas, distribuídas em 3 dias (turnos) de produção, sendo que a Máquina de Impressão 01 ficou operante por 10 horas incluindo as 2 horas extras, a Máquina de Impressão 02 por 6 horas sem necessitar de horas extras, a Máquina de Impressão 03 por 2 horas sem a necessidade de horas extras, a Máquina de Impressão 4 por 20 horas incluindo 3 horas extras, a Máquina de Impressão 05 por 20 horas, incluindo 4 horas extras, a Máquina de Acabamento 01 por 3 horas sem horas extras, a Máquina de acabamento 02 por 2 horas sem horas extras e a Máquina de acabamento 03 por 20 horas incluindo as 3 horas extras.

Pode ser visto também que a maior concentração de itens ficou nas Máquinas de Impressão 04 e 05 e Máquina de Acabamento 03 por conta do baixo consumo energético delas.

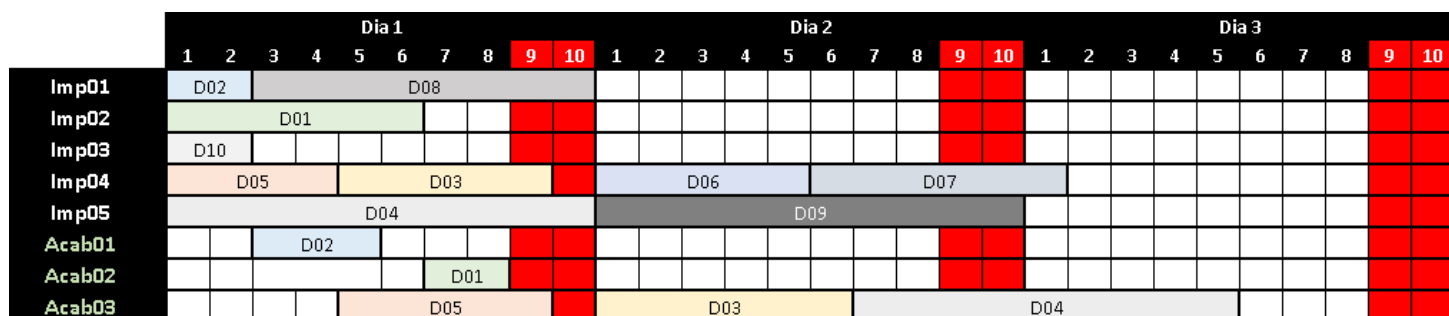


Figura 16 - Diagrama de Gantt relativo à Carteira I (minimização do custo de consumo)
Fonte: autoria própria

Na Figura 17 evidencia-se o resultado obtido na Tabela 10, relativa à Carteira II e à minimização do custo de consumo, onde pode ser visto quatro itens na Máquina de Impressão 01, 05 e Máquina de Acabamento 03, apenas um item nas Máquinas de Impressão 02 e Máquina de Acabamento 02, dois itens na Máquina de Impressão 03 além de nove itens na Máquina de Impressão 04 e cinco itens na Máquina de Acabamento 01.

A produção da Carteira II foi finalizada em um total de 184 horas, distribuídas em 4 dias (turnos) de produção, sendo que a Máquina de Impressão 01 ficou operante por 30 horas incluindo 6 horas extras, a Máquina de Impressão 02 por 5 horas sem necessitar de horas extras, a Máquina de Impressão 03 por 23 horas incluindo 4 horas extras, a Máquina de impressão 4 por 31 horas incluindo 5 horas extras, a Máquina de Impressão 05 por 31 horas, incluindo 6 horas extras, a Máquina de Acabamento 01 por 30 horas incluindo 6 horas extras, a Máquina de acabamento 02 por 6 horas sem horas extras e a Máquina de acabamento 03 por 28 horas incluindo 4 horas extras.

Pode ser visto também que a maior concentração de itens ficou nas Máquinas de Impressão 04 e 05 e Máquina de Acabamento 01 e 03 por conta do baixo consumo energético delas.

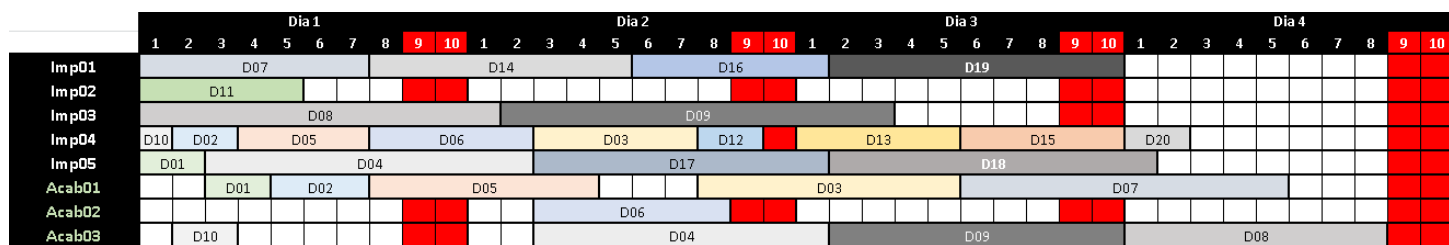


Figura 17 – Diagrama de Gantt relativo à Carteira II (minimização do custo de consumo)
Fonte: autoria própria

Na Figura 18 evidencia-se o resultado obtido na Tabela 12, relativa à Carteira III e à minimização do custo de consumo, onde podem ser vistos 11 itens na Máquina de Impressão 01, apenas um item nas Máquinas

de Impressão 02 e 03, 30 itens na Máquina de Impressão 04, 7 itens nas Máquinas de Impressão 05, 18 itens na Máquina de Acabamento 03 além de 11 itens na Máquina de Acabamento 02 e 6 itens na Máquina de Acabamento 02.

A produção da carteira III foi finalizada em um total de 476 horas, distribuídas em 11 dias (turnos) de produção, sendo que a Máquina de Impressão 01 ficou operante por 64 horas incluindo 12 horas extras, a Máquina de Impressão 02 por 4 horas sem necessitar de horas extras, a Máquina de Impressão 03 por 2 horas sem a necessidade de horas extras, a Máquina de impressão 04 por 95 horas incluindo as 13 horas extras, a Máquina de Impressão 05 por 95 horas incluindo as 15 horas extras, a Máquina de Acabamento 02 por 26 horas incluindo 5 horas extras, a Máquina de Acabamento 01 por 100 horas incluindo 13 horas extras e a Máquina de Acabamento 03 por 90 horas incluindo as 18 horas extras

Pode ser visto também que a maior concentração de itens ficou nas Máquinas de Impressão 04 e 05 e Máquina de Acabamento 01 e 03 por conta do baixo consumo energético delas.

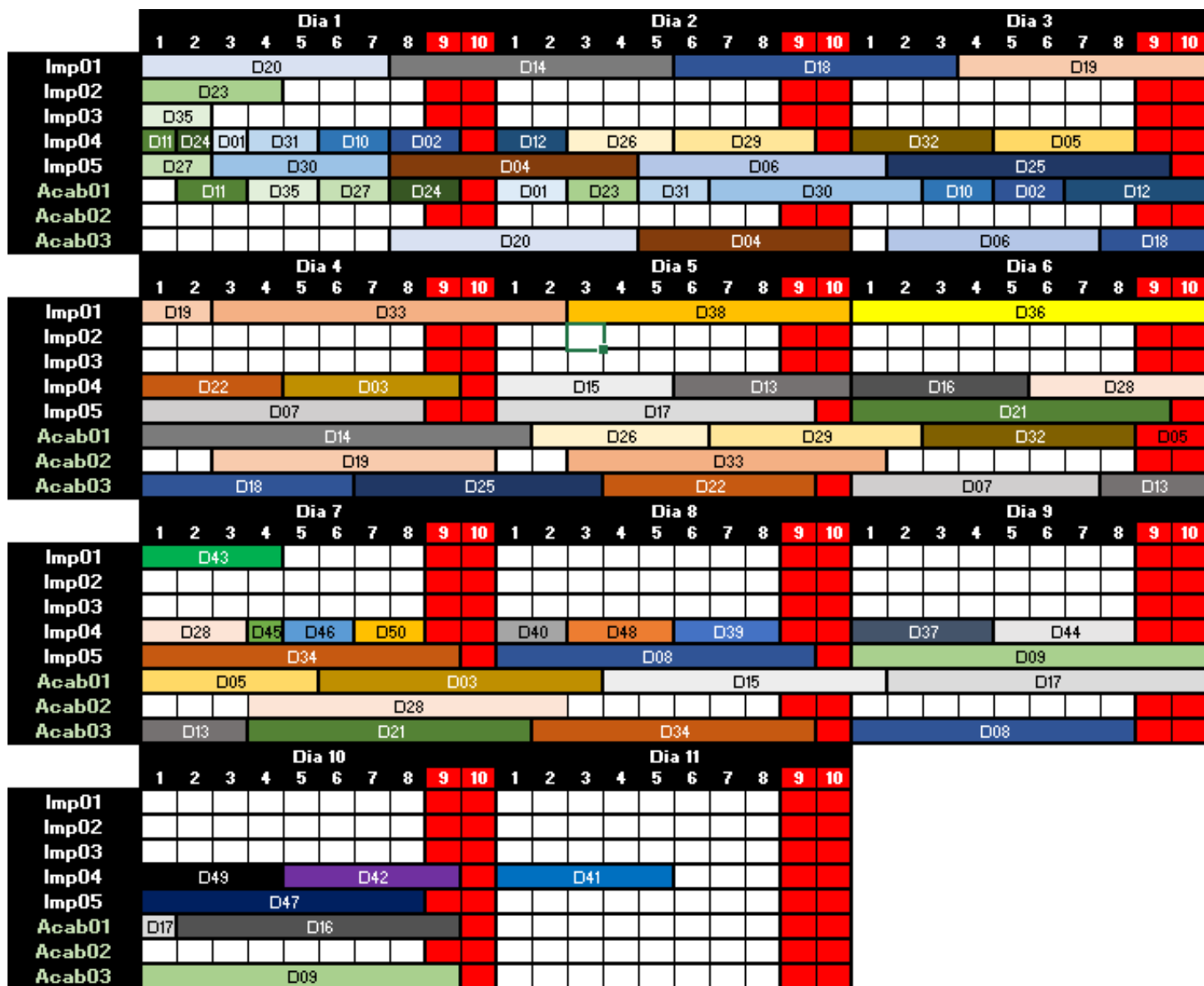


Figura 18 - Diagrama de Gantt relativo à Carteira III (minimização do custo de consumo)
 Fonte: autoria própria

Da mesma forma, com os passos definidos de 1 a 4 e os resultados obtidos nas Tabelas 9, 11 e 13, que visa a minimização do tempo operacional, foi realizado um planejamento dos itens a serem produzidos no horizonte de planejamento, representados nos Diagramas de Gantt vistos nas Figuras 19, 20 e 21.

Na Figura 19 evidencia-se o resultado obtido na Tabela 12, relativa à Carteira I e à minimização do tempo de operação, onde pode ser visto três itens na Máquina de Impressão 01, apenas um item nas Máquinas de Impressão 02, 03, 05 e Máquinas de Acabamento 01 e 03, quatro itens na Máquina de Impressão 04, e três itens na Máquina de Acabamento 02.

A produção da Carteira I foi finalizada em um total de 79 horas, distribuídas em 3 dias (turnos) de produção, sendo que a Máquina de Impressão 01 ficou operante por 20 horas incluindo 4 horas extras, a Máquina

de Impressão 02 por 5 horas sem necessitar de horas extras, a Máquina de Impressão 03 por duas horas sem horas extras, a Máquina de impressão 4 por 21 horas incluindo as quatro horas extras, a Máquina de Impressão 05 por oito horas sem horas extras, a Máquina de Acabamento 01 por duas horas sem horas extras, a Máquina de Acabamento 02 por 18 horas incluindo quatro horas extras e a Máquina de Acabamento 03 por três horas incluindo sem horas extras

Pode ser visto também que a maior concentração de itens ficou nas Máquinas de Impressão 01 e 04 e Máquina de Acabamento 02 por conta da alta velocidade delas.

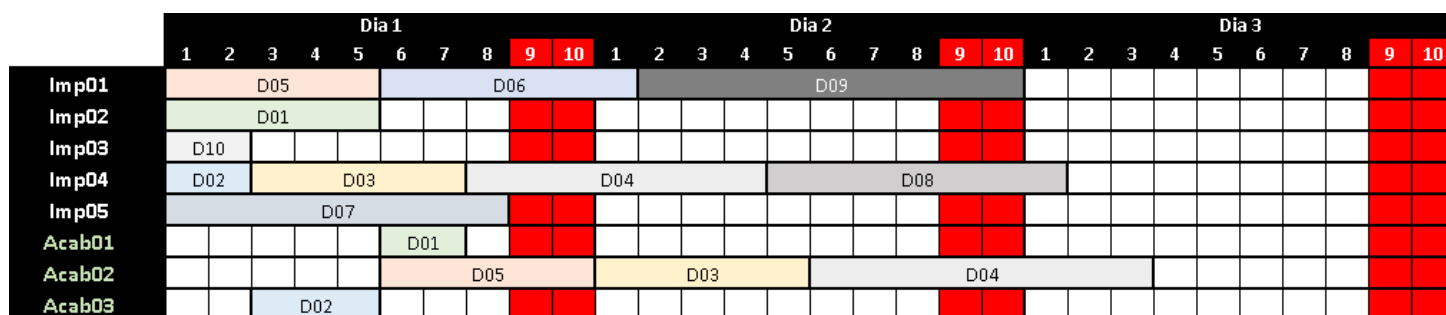


Figura 19 - Diagrama de Gantt relativo à Carteira I (minimização do tempo operacional)
 Fonte: autoria própria

Na Figura 20 evidencia-se o resultado obtido na Tabela 11, relativa à Carteira II e à minimização do tempo de operação, onde pode ser visto quatro itens na Máquina de Impressão 01, 05 e Máquina de Acabamento 03, apenas um item nas Máquinas de Impressão 02 e Máquinas de Acabamento 01, dois itens na Máquina de Impressão 03, nove itens na Máquina de Impressão 04, e três itens na Máquina de Acabamento 02.

A produção da Carteira II foi finalizada em um total de 177 horas, distribuídas em 4 dias (turnos) de produção, sendo que a Máquina de Impressão 01 ficou operante por 30 horas incluindo seis horas extras, a Máquina de Impressão 02 por cinco horas sem necessitar de horas extras, a Máquina de Impressão 03 por 23 horas incluindo quatro horas extras, a Máquina de Impressão 04 por 31 horas incluindo seis horas extras, a Máquina de Impressão 05 por 31 horas incluindo seis horas extras, a Máquina de Acabamento 01 por oito horas sem horas extras, a Máquina de Acabamento 02 por 29 horas incluindo cinco horas extras e a Máquina de Acabamento 03 por 20 horas incluindo uma hora extra.

Pode ser visto também que a maior concentração de itens ficou nas Máquinas de Impressão 01, 04, 05 e Máquina de Acabamento 02 por conta da alta velocidade delas.

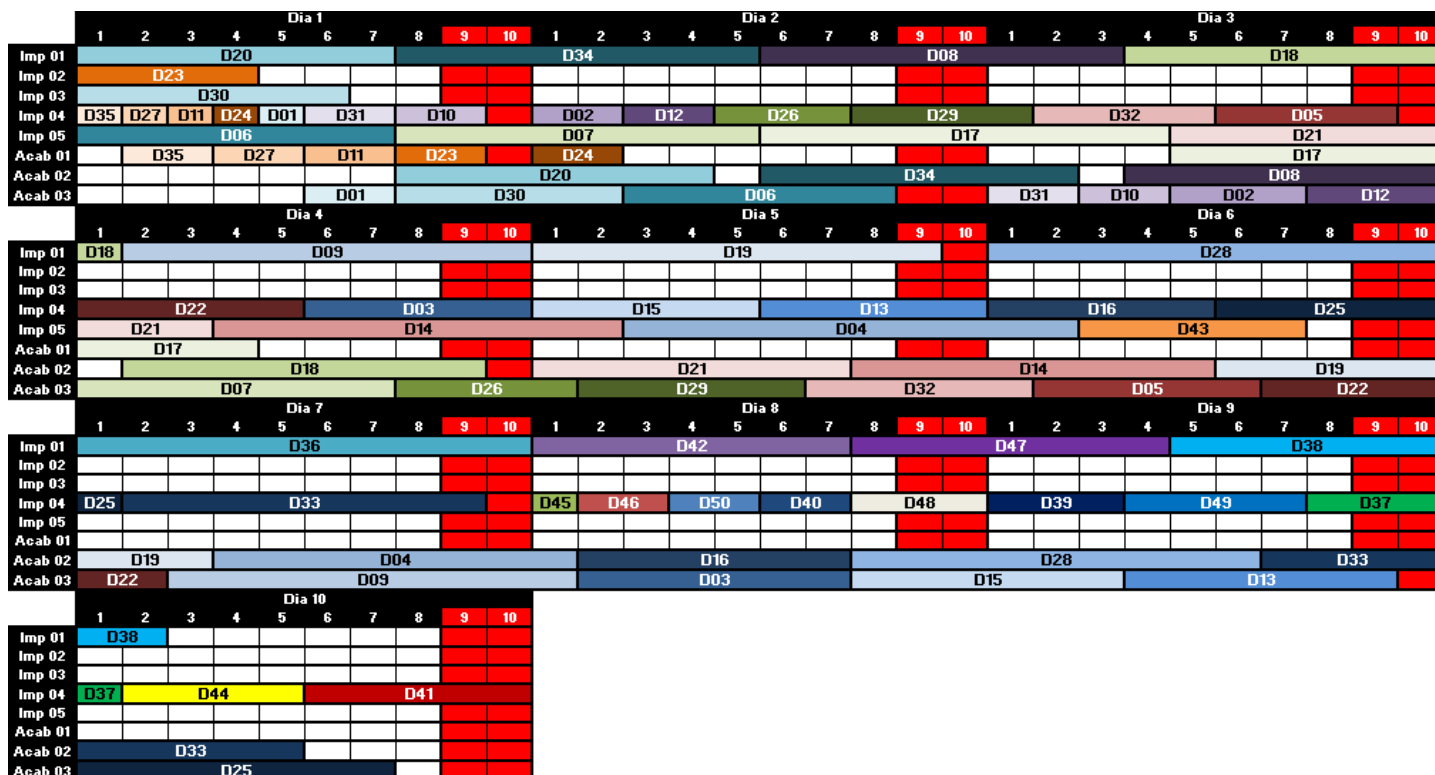


Figura 21 - Diagrama de Gantt relativo à Carteira III (minimização do tempo operacional)
 Fonte: autoria própria

Na Tabela 14 é apresentado um resumo considerando os resultados obtidos a partir das Figuras 16 a 21, levando em conta o número de itens e os arredondamentos nas horas. Nela estão os custos para produção (Consumo e Tempo) para o horizonte proposto pelo PPCP, lembrando que se trata de apenas um possível exemplo. Nesta Tabela, consta na última linha os custos obtidos a partir da resolução do modelo, e é possível verificar que este tem um custo menor comparado à programação e planejamento sugerido pelo PPCP.

Tabela 14 – Resumo Horizonte de Planejamento (Itens e Horas)

	Carteira de Pedidos I - 10 Itens				Carteira de Pedidos II - 20 Itens				Carteira de Pedidos III - 50 Itens			
	Min. Custo Consumo		Min. Tempo Operacional		Min. Custo Consumo		Min. Tempo Operacional		Min. Custo Consumo		Min. Tempo Operacional	
	Nº Itens	Tempo	Nº Itens	Tempo	Nº Itens	Tempo	Nº Itens	Tempo	Nº Itens	Tempo	Nº Itens	Tempo
Imp 01	2	10	3	20	4	30	4	30	8	64	11	91
Imp 02	1	6	1	6	1	5	1	5	1	4	1	4
Imp 03	1	2	1	2	2	23	2	23	1	2	1	6
Imp 04	4	20	4	21	9	31	9	31	28	95	30	97
Imp 05	2	20	1	8	4	31	4	31	12	95	7	57
Acab 01	1	3	1	2	5	30	1	8	20	100	6	20
Acab 02	1	2	3	18	1	6	5	29	3	26	11	84
Acab 03	3	20	1	3	4	29	4	20	12	90	18	87
Tempo Total	83		80		185		177		476		446	
Consumo	3.038,40		4.338,00		7.025,80		8.271,80		17.352,60		21.394,60	
Custo total	R\$	2.613,02	R\$	3.730,68	R\$	6.042,19	R\$	7.113,75	R\$	14.923,24	R\$	18.399,36
Custo Ideal	R\$	2.557,59	R\$	3.665,03	R\$	5.891,47	R\$	7.078,96	R\$	14.772,26	R\$	18.268,40

Nos Diagramas de Gantt representados nas Figuras 16 a 21, estão algumas possíveis opções de ajustamento da produção ao criar um sequenciamento dos itens a partir da distribuição dos itens às máquinas

designadas pelo modelo. Nessas figuras é possível verificar os dias de trabalho (turnos) considerando as oito horas normais de trabalho, bem como são destacadas em vermelho as horas–extras necessárias para cada turno.

A carteira de pedidos I com 10 itens foi ajustada em um horizonte de planejamento de 3 dias, enquanto a carteira de pedidos II com 20 itens, em 4 dias e a Carteira de pedidos III com 50 itens, em 12 dias. A partir do ajustamento de produção feito pelo PPCP seguindo os passos 1 a 4, observa-se em relação às soluções obtidas pelo modelo da Seção 3.2 que considerou a minimização do custo de consumo ou do tempo de operação que, houve um aumento no custo total da operação em ambos os casos: para a carteira I houve um aumento de R\$54,30 (2,2%) e R\$65,70 (1,8%); para a carteira II o aumento foi de R\$150,70 (2,6%) e R\$34,80 (0,5%); para a carteira III o aumento foi de R\$151,00 (1%) e R\$131,00 (0,7%), respectivamente. Observa-se que o maior aumento de tempo de operação ocorreu em relação à carteira III, de 462 horas para 476 horas, para a minimização do custo de consumo, cuja variação foi de, aproximadamente, 3,0% em relação às soluções obtidas pelo modelo da Seção 3.2 vistas na Tabela 12 , bem como de 427,5 horas para 445 horas, para a minimização do tempo de operação, cuja variação foi de, aproximadamente, 4% em relação às soluções obtidas pelo modelo, vistas na Tabela 13.

O PPCP pode a qualquer momento efetuar trocas, em caso de necessidade, da sequência em que os itens são alocados nas máquinas, desde que não seja alterada a designação dos itens às máquinas de impressão e de acabamento.

Os resultados obtidos quando se considerou a minimização do custo de consumo ou do tempo operacional mostram a dificuldade de se definir um critério de prioridade na produção da indústria gráfica pois, ao se priorizar o custo de consumo aumenta-se o tempo operacional de produção bem como, ao se priorizar o tempo operacional aumenta-se o custo de consumo, corroborando a afirmação feita em Russomano (2000) quanto a dificuldade em se definir um critério de prioridade entre os trabalhos (Apêndice A). Outros critérios poderiam ser considerados no modelo como objetivos da indústria, entre eles o atendimento das datas de entrega ou a maximização dos lucros na produção de itens, os quais não foram considerados nesse trabalho.

Conclusões

Neste trabalho foi proposto um modelo matemático para auxiliar a otimização do PPCP de uma indústria gráfica, através da designação de itens a serem produzidos em máquinas de impressão e de acabamento, visando a minimização do custo de consumo de energia elétrica ou do tempo operacional da produção com as restrições operacionais vistas no Capítulo 3. Na sua formulação o modelo de designação proposto para a tomada de decisão pelo setor de PPCP foi simplificado quando desconsiderou fatores internos do processo produtivo relativos à disponibilidade de insumos, prazos de entrega e estoque dos itens comercializados.

O modelo proposto foi implementado em uma linguagem algébrica de programação (GAMS-CPLEX) e testes computacionais foram realizados considerando uma carteira de itens a serem produzidos para os clientes e os dados das máquinas fornecidos pela indústria gráfica, tais como os tempos médios de setup, as velocidades de processamento e respectivos consumos energéticos.

Os resultados obtidos mostraram a eficiência do modelo proposto para auxiliar o PPCP possibilitando à indústria reduzir o seu gasto com o consumo energéticos, por exemplo quando as tarifas de energia ficam mais caras. Por outro lado, a redução do tempo operacional pode ser considerada, quando a carteira de pedidos dos clientes aumenta e a indústria queira acelerar o seu processo de produção, em contrapartida aumentando o seu consumo energético. Nos resultados observou-se que, quando se priorizou a redução do consumo, o modelo designou os itens nas máquinas cujos consumos energéticos foram menores, não levando em consideração as suas respectivas velocidades de operação, o que resultou no aumento do tempo operacional. Por outro lado, quando se priorizou a redução do tempo operacional, o modelo alocou os itens nas máquinas com maior velocidade, resultando em um maior consumo de energia e, conseqüentemente, um maior custo de consumo energético para atender a carteira de pedidos.

Após a designação feita a partir do modelo proposto no Capítulo 3, uma heurística de ajustamento da produção foi realizada a fim de sequenciar e programar a produção dos itens em turnos pré-definidos no horizonte de planejamento. Para os estudos de casos vistos, o horizonte de planejamento foi considerado em uma jornada semanal com turnos de produção diários. Para o ajustamento da produção, a partir da designação dos itens às máquinas, foram os condicionadores (passos 1 a 4) descritos na Seção 4.2, que possibilitaram sequenciar, programar e controlar a produção dos itens em seus respectivos turnos no horizonte de planejamento. O modelo possibilita que o horizonte de planejamento seja ampliado e considerado, por exemplo, uma jornada de produção mensal.

Como trabalhos futuros, dando continuidade a esse tem-se a possibilidade de: i) trabalhar com carteiras de itens de clientes maiores, para um horizonte de planejamento com jornada mensal; ii) investigar a curva *trade-off* de custo de consumo *vs.* tempo operacional de produção, os quais são objetivos conflitantes, definindo um modelo multiobjetivo e resolvendo-o através de métodos de otimização multiobjetivo; iii) elaboração de um

modelo geral para o PPCP, que considere as restrições operacionais vistas, turnos e condicionadores para o ajustamento da produção de itens nestes, possivelmente, com a inclusão de estoques de itens produzidos.

Trabalhos apresentados e publicados

MENEZES L. F.; A. R. BALBO; CHERRI A. C., SOLER, E. M. OPTIMIZATION SIMULATION OF THE ENERGY CONSUMPTION OF A SET OF ROTATIVE PRINTERS IN A GRAPHIC INDUSTRY. In: Workshop de Otimização. IBB – Instituto de Biociências de Botucatu, UNESP. 2016.

MENEZES L. F.; A. R. BALBO; CHERRI A. C., SOLER, E. M. OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM UMA INDÚSTRIA GRÁFICA. In: VII Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UNESP. 2017. p.74 - 75.

MENEZES L. F.; A. R. BALBO; CHERRI A. C., SOLER, E. M. OTIMIZAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO EM UMA INDÚSTRIA GRÁFICA. In: ERMAC, Bauru. Caderno de resumos e trabalhos completos. 2017. p. 254 - 259.

Referências Bibliográficas

- ARENALES, M. et al. Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011
- BAKER, K. R. Introduction to Sequencing and Scheduling. John Wiley. New York, 1974. 112 p.
- VARGAS, S. B.; COSER, T.; DE SOUZA, M. A. Mensuração dos Custos Logísticos: Estudo de Caso em uma Indústria Gráfica. Contabilidade Vista & Revista [en linea]. 2016, 27(1), 63-87[fecha de Consulta 22 de Julio de 2021]. ISSN: 0103-734X.
- BENEDETTO, C. M, NIKOLAY, S. A.; Sistemas de custeio: estudo a ser aplicado em uma indústria gráfica. Trabalho de Conclusão de Curso da Pós-graduação. 2021
- BERMANN, C. Energia no Brasil: para quê? Para quem? Crise e Alternativas para um país sustentável. 1. Ed. Livraria da Física/FASE: São Paulo, 2002.
- BRAUN, Jan Raphael Reuter; GOMEZ, Luiz Salomão Ribas; MERINO, Eugênio Andrés Diaz. Etapas para Geração de um Produto Gráfico Sustentável Stages for Generation of a Sustainable Graphic Product.
- CHERRI, L. H.; CHERRI, A. C.; MUNDIM, L. R.; VIANNA, A. C. G. Designação de veículos para transporte de carga a centros de distribuição, XXXIX CNMAC, Minas Gerais, 2019.
- CHIAVENATO, I. Planejamento e Controle da Produção. 2. ed. Barueri- SP: Manole, 2008. 159p.
- CORRÊA, H. L., CORRÊA, C. A. Administração de produção e operação. 2 ed. Ed. Atlas, 2006
- CORREIA, Marta Pinto. Melhoria dos fluxos de material e informação numa Indústria Gráfica. 2016.
- DE OLIVEIRA, Otávio José. Análise da influência da estratégia de gestão da produção eto sobre a gestão de estoques em uma indústria gráfica. ENEGEP, Bahia, 2009.
- DENIZEL, M., ALTEKIN, F. T., SÜRAL, H. e STADTLER, H., 2008. Equivalence of the LP relaxations of two strong formulations for the capacitated lot-sizing problem with *setup* times. OR Spectrum, vol. 30, 4: 773–785. GOLDEMBERG, J. 1998. Energia e desenvolvimento. Estudos Avançados volume 12 no. 33. USP, São Paulo, 1998.
- DO ESPÍRITO SANTO, E. Alocação de custos na indústria gráfica: uma abordagem conceitual. In: Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC. 2004.
- FAVARETTO, F. Uma contribuição ao processo de gestão da produção pelo uso da coleta automática de dados de chão de fábrica. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.
- FURLANETTO, Planejamento programação e controle da produção. Monografia para obtenção de MBA, Faculdade de Engenharia de Produção, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2004
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GRAVES, S. C. A Review of Production Scheduling. *Operations Research*, v29, p. 646-675, 1981.

JOO, C. M. e KIM, B. S. Machine scheduling of time-dependent deteriorating jobs with determining the optimal number of rate modifying activities and the position of the activities. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2015

KARIMI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; WILSON, J. M. Omega. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. v. 31, p. 365-378, 2003.

LAUGENI, F. P.; MARTINS, P. G.. *Administração da Produção*. São Paulo: Saraiva, 2003

LE PAPE, C. Constraint-based scheduling: A tutorial. *Proceedings of the 1st International Summer School on Constraint Programming*, 2005.

LIMA, Osiran. *Lean na indústria gráfica: um estudo de caso*. Lean Institute Brasil, 2007.

LUSTOSA, L. J.; DE MESQUITA, M. A.; OLIVEIRA, R. J. *Planejamento e controle da produção*. Elsevier Brasil, 2008

MANNE, A.S. *Management Science*. Programming of economic lot sizes. p. 115 - 135, 1958.

MONTEIRO, C.; VENTURA, C.; MARTINS, F. A new approach for the extraction of pollutants from wastewaters handled by the graphic industry. *Journal of environmental management*, v. 122, p. 99-104, 2013.

MOREIRA, António André da Costa. *Optimização das condições de operação de uma indústria gráfica*. 2017. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2017.

PINEDO, M.L. *Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems*. 3 ed, New York, 2008.

RUSSOMANO, V. H. *Planejamento e Controle da Produção*. 5. ed. São Paulo: Pioneira, 1995. 320p.

PEDROSA, Hirlandson Ricardo; ROMERO, JFA. Algoritmo para automação dos processos de planejamento da produção na área gráfica-job shop. Instituto Tecnológico de Aeronáutica–Divisão de Engenharia Eletrônica, 2012.

RUSSOMANO, V. H. *Planejamento e controle da produção*. 6. ed. rev. São Paulo: Pioneira, 2000

SANTOS, VINNICYUS BRANCO DE MORAIS; MOREIRA, LUIS PHILIPPE DO CARMO; LEANDRO, RAFAEL. Proposições para a redução do tempo de setup no processo produtivo de impressos: um estudo de caso aplicado em uma indústria gráfica. *Anais do IV SINGEP – São Paulo – SP – Brasil – 08, 09 e 10/11/2015*

SOLER, E. M.; TOLEDO, F. M. G.; DOS SANTOS, M. O.; ARENALES, M. N. Production. Otimização dos custos de energia elétrica na programação da captação, armazenamento e distribuição de água, v. 26, n. 2, p. 2-5, 2016.

TAGLIALENHA, S. L. S. et al. Otimização do sequenciamento de tarefas em máquinas paralelas com tempos de processamento diferentes. 2017

TAHA, H. A. Pesquisa Operacional. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2008. 359 p.

TAVARES, F. P. Simulated annealing aplicado no problema de designação de tarefas de um laboratório. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro Universitário da Fei, São Bernardo do Campo, 2013

TRIGEIRO, W. W.; THOMAS, J.; MCCLAIN, J. O. Management Science. Capacitated lot sizing with *setup* times. v. 35, n. 3, p. 353-366, 1998.

TEIXEIRA, C. S.; KÖRBES, D.; ROSSI, A.G. Ruído e equilíbrio: aplicação da posturografia dinâmica em indústria gráfica. Rev. CEFAC. 2011 Jan-Fev; 13(1):92-101

VAZ, José Pedro Ramos. Planeamento do processo produtivo e otimização dos tempos de preparação e de produção na secção de impressão de uma indústria gráfica. 2019. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2019

XAVIER, A. S; Sequenciamento preemptivo e designação de tarefas em máquinas paralelas uniformes com técnicas de fluxo em redes. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

WAGNER, H.; WITHIN, T. Management Science. Dynamic version of the economic lot size model., v. 5, p. 89-96, 1958.

Apêndice A - A Programação Linear Inteira (PLI) e os problemas de designação de tarefas, de dimensionamento de lotes e de sequenciamento de lotes

A Programação Linear permite o entendimento de todos os modelos de programação matemática servindo de base para outros estudos mais avançados (Goldbarg e Luna, 2005). Por conta da alta capacidade de cálculo, ele é considerado extremamente eficiente diante dos algoritmos o que permite que ele seja facilmente implementado através de planilhas (Taglialenha et al. 2017).

A partir do momento que o problema passa a trabalhar e ser modelado através de um modelo linear inteiro, onde é utilizado valores que pertençam ao conjunto dos números inteiros, ou discretos, passamos a chamar este de Programação Linear Inteira (Taha, 2008).

Programação Linear Inteira (PLI) caracteriza-se como uma técnica de otimização voltada para a solução de modelos descritos por equações lineares, cujas variáveis de decisão só podem assumir valores inteiros. A utilização de métodos matemáticos, quando implementados computacionalmente, alicerçam, e fundamentam a tomada de decisão.

(Furlaneto, 2004)

As seções seguintes abordam problemas que se inserem como problemas de programação inteira, tais como os de planejamento, programação, controle e sequenciamento da produção e de dimensionamento de lotes.

A1 Designação de tarefas

O problema de designação, abrange todos os ramos de atividade em que se necessite alocar tarefas à pessoas ou máquinas.

Arenales et al. (2011), cita que é o tipo de problema mais simples da categoria quando se considera o número de tarefas igual ao número de pessoas ou máquinas a receber tal tarefa.

Tavares (2013) exemplifica com a designação de professores às salas de aulas, onde nesse tipo de problema existem restrições básicas de que uma aula não pode ser dada na mesma janela de tempo em dois lugares diferentes, um professor não pode dar mais que uma aula na mesma janela de tempo e que uma sala de aula não pode ter mais do que uma aula na mesma janela de tempo.

Cherri et al. (2019), aborda o problema de designação de veículos de transportes de cargas em centros de distribuição, e cita ainda que um problema de designação consiste em designar um conjunto de tarefas a um conjunto de agentes, em que cada agente pode realizar várias tarefas e cada tarefa só pode ser realizada por um agente. As maiores aplicações são encontradas em problemas de alocação de recursos humanos.

Xavier (2020) mostra como a designação auxilia o setor de PPCP nas tomadas de decisões rápidas enquanto negociam datas de entrega dos pedidos. Por vezes, as técnicas de sequenciamento não são praticadas nas empresas por descaso da análise das consequências que estas podem gerar. Enquanto na literatura, grande parte dos estudos utilizam técnicas de sequenciamento, mas sem utilizar dados reais.

A2 Dimensionamento de lotes

De acordo com Karimi et al. (2003), os PDL consistem em determinar a quantidade a ser produzida de cada item e o momento em que a produção deve ocorrer, otimizando os custos envolvidos durante a fabricação, considerando um horizonte de planejamento que pode ser de curto, médio ou longo prazo.

Os primeiros trabalhos para a resolução dos PDL foram propostos por Manne (1958) e Wagner e Whitin (1958) os quais abordam o problema com um único tipo de item a ser produzido e sem restrições quanto a capacidade de produção para esse item. A partir desses trabalhos, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas referentes a esses problemas, contemplando particularidades que surgem durante um processo produtivo.

Uma extensão para o PDL envolve a tomada de decisão para realizar a produção de vários itens num mesmo período. Neste problema, conhecido como PDL Multi-Itens, além de determinar a quantidade de cada item a ser produzida, deve-se levar em consideração que estes itens possuem um custo de produção, de preparação e de armazenamento em estoque. Além disso, pode-se considerar que há um tempo para que cada item seja produzido e para a preparação da linha de produção (máquina).

Trigeiro et al. (1989) apresentaram o primeiro trabalho com um método para a resolução do PDL com tempos de preparação para produção. Basicamente, o método consiste em dualizar as restrições de capacidade e os subproblemas obtidos são resolvidos de forma exata pelo método proposto por Wagner e Whitin (1958).

A literatura referente aos PDL é bastante vasta, assim como inúmeros trabalhos que apresentam estudos e propostas para a redução do consumo de energia elétrica no setor industrial. Entretanto, trabalhos que consideram as duas abordagens simultaneamente não foram encontrados.

A3 Sequenciamento de Lotes (*Schedulling*)

O sequenciamento se faz presente dentre as funções citadas acima como atribuições do PPCP. Neste sequenciamento o PPCP deve analisar todas as ordens de produção, analisar os insumos disponíveis e necessário para a produção dos itens e também o prazo máximo para início e conclusão do processo produtivo, sem deixar de levar em consideração a capacidade produtiva disponível

A capacidade de produção de uma indústria nada mais é que o potencial produtivo em situações normais na fabricação dos itens. Existe um potencial produtivo ideal, que representa o volume ideal de produção em uma máquina onde se consiga obter o máximo de lucratividade e ainda o mínimo de custos em mão de obra, manutenção e desperdícios (Chiavenato, 2008).

Chiavenato (2008) e Furlanetto (2004) dividem em 4 os fatores que compõem a capacidade de produção, que são:

1. Capacidade instalada, representa o número de equipamentos que a empresa possui junto ao potencial de produção que eles permitem alcançar.
2. Mão de Obra disponível, quantidade de colaboradores à disposição da empresa para executar as ordens de produção.
3. Matéria Prima disponível, são os materiais e insumos que os fornecedores entregam às indústrias.
4. Recursos financeiros, capacidade de investimentos em produção e compra das Matérias primas.

O *Schedulling* é a otimização da utilização das máquinas tentando minimizar ao máximo o tempo de ociosidade delas, que é um passo muito importante na tentativa de reduzir o consumo de energia elétrica, e assim minimizando os custos das indústrias.

Sequenciamento de máquinas são as diretrizes sobre a ordem em que a produção será realizada, respeitando prioridades e as restrições impostas pelo processo industrial. Para classificar os modelos de sequenciamento necessita-se caracterizar os dados sobre os recursos e o comportamento das operações. Pode haver um ou vários tipos de recursos, que podem ser especializados (um recurso executa um determinado tipo de operação) ou paralelos (diversos recursos executando uma mesma operação)

(Baker, 1974).

Um dos objetivos do sequenciamento segundo Correa et al. (2006) é criar regras de forma que algumas ordens de produção sejam priorizadas em relação às demais e assim conseguir a melhor sequência possível para racionar o uso dos recursos produtivos. Este se torna um processo muito importante no processo de fabricação

por conta de sua dinâmica dos processos fabris, como por exemplo a necessidade de produção de algum item inesperado e as possíveis alterações em datas de entrega. (Joo e Kim, 2015).

O problema de sequenciamento de lotes ou tarefas é mais abordado quando se leva em conta a lista de pedidos a serem produzidos em uma única máquina, mas também quando se tem máquinas trabalhando em paralelo, podendo elas serem idênticas ou com alguma diferença de velocidade que venha a alterar o tempo de processamento. (Pinedo, 2008). Podemos ver em Lustosa et al. (2008), que a teoria de programação pode ser dividida de quatro formas: Uma máquina, Máquinas Paralelas, Máquinas em Série e Oficina de Máquinas.

Graves (1981) enumera cinco elementos fundamentais para designação deste sequenciamento, 1. Tempo de Espera Inicial; 2. Tempo de *Setup*; 3. Tempo de Produção; 4. Tempo de Espera entre Máquinas; 5. Tempo de Movimentação.

Russomano (2000) cita o quanto difícil é definir um critério de prioridade entre os trabalhos, sendo os mais comuns entre eles o atendimento das datas de entrega, maximizar os lucros e minimização dos custos, mas em alguns casos não é possível satisfazer todas as necessidades, como por exemplo, ao se priorizar o atendimento de prazo podemos aumentar o gasto em produção.