

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**CAMILA MATOS**

**MODELO PARA INTEGRAR O CUSTO COM CONSUMO DE  
ENERGIA ELÉTRICA E DEMANDA DE POTÊNCIA AO  
PLANEJAMENTO AGREGADO DE PRODUÇÃO**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA  
2019**

**CAMILA MATOS**

**MODELO PARA INTEGRAR O CUSTO COM CONSUMO DE  
ENERGIA ELÉTRICA E DEMANDA DE POTÊNCIA AO  
PLANEJAMENTO AGREGADO DE PRODUÇÃO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus de Ponta Grossa-PR.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Vanderley Herrero Sola

**PONTA GROSSA  
2019**

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa  
n.63/19

M433 Matos, Camila

Modelo para integrar o custo com consumo de energia elétrica e demanda de  
potência ao planejamento agregado de produção. / Camila Matos, 2019.  
97 f.; il. 30 cm.

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná, Ponta Grossa, 2019.

1. Planejamento da produção. 2. Controle de produção. 3. Energia elétrica -  
Consumo. 4. Fator de potência. I. Sola, Antonio Vanderley Herrero. II.  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. III. Título.

CDD 670.42



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Ponta Grossa**  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

Título de Dissertação Nº **344/2019**

**MODELO PARA INTEGRAR O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E DEMANDA ELÉTRICA AO PLANEJAMENTO AGREGADO DE PRODUÇÃO**

por

**Camila Matos**

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas de **12 de julho de 2019**, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rubya Vieira de Mello Campos  
(UEM)

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Yslene Rocha Kachba  
(UTFPR)

Prof. Dr. João Carlos Colmenero  
(UTFPR)

Prof. Dr. Antônio Vanderley Herrero Sola  
(UTFPR)  
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Cassiano Moro Piekarski  
Coordenador do PPGEP  
UTFPR - Campus Ponta Grossa

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE  
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR - CÂMPUS PON GROSSA

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar a vida, uma família e amigos incríveis e me guiar por caminhos difíceis para que eu aprenda a cada dia confiar em sua graça e aumentar a minha fé. Em tudo dou graças.

A minha família pelo apoio e amor incondicional que me fornecem mesmo a distância todos os dias, em especial a meus pais Valdecir e Isabel por serem o maior exemplo de persistência e perseverança. Vocês e minha irmã Bruna, são minha base para tudo, eu amo muito vocês.

Aos meus amigos, os de longe que me alegram e apoiam por mensagens e chamadas de vídeos dia a dia e aos de perto, por todo companheirismo, parceria e ajuda que me deram no decorrer desta caminhada. Em especial, agradeço aos de longe Natalia, Luana, Flávia, Jeferson, André e Fernando, e aos de perto Kaline, Ana Laura, Bethania, Ana Cristina, Luis Fernando, Vitor, André e Matheus. Fiquem certos de que vocês fizeram a diferença para que eu chegasse até aqui hoje. Agradeço também a todos do LabErgo e do Eore, que me receberam em seus laboratórios como se eu fizesse parte deles. A caminhada foi muito mais leve com vocês, muito obrigada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antônio Vanderley Herrero Sola, pela oportunidade, todos os ensinamentos, paciência e principalmente por acreditar na minha capacidade.

Aos membros da banca Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rubya Vieira de Mello Campos, Prof. Dr. João Carlos Colmenero e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Yslene Rocha Kachba, que aceitaram o convite e por contribuírem com imensa sabedoria para o enriquecimento deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, aos professores do PPGEP e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa concedida durante o período desta pesquisa.

A cooperativa que gentilmente abriu as portas e me recebeu com muita disponibilidade e atenção. E a todos os demais, sem exceção, que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho e etapa da minha vida.

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso,  
ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou  
você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

(Ayrton Senna)

## RESUMO

MATOS, Camila. **Modelo para integrar o custo com consumo de energia elétrica e demanda de potência ao planejamento agregado de produção**. 2019. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

Os constantes aumentos dos custos com tarifas de eletricidade, bem como a obrigatoriedade de contratação prévia de demanda de potência por parte das empresas ligadas ao sistema elétrico em alta tensão, impulsionam as organizações a melhorarem o planejamento energético nos seus processos de produção. Além disso, as incertezas de mercado fazem com que apenas os métodos estocásticos sejam insuficientes para previsão de demanda de produção futura. Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi propor um modelo que integre o custo com consumo de energia elétrica e demanda de potência ao planejamento agregado de produção, considerando as incertezas de mercado. O modelo foi aplicado em uma indústria alimentícia, a partir de uma família de produtos de batatas fritas. A partir dos dados coletados, foi realizada uma previsão de demanda para uma posterior realização do planejamento agregado, utilizando o modelo de previsão de Holt-Winter. Em seguida as incertezas de mercado foram tratadas com o método fuzzy aplicado a partir da análise da previsão de demanda feita pelo decisor. Antes da modelagem do planejamento agregado foi calculada a nova demanda de potência e, por fim, a verificação da solução do modelo. Os resultados mostraram que o modelo sugerido conseguiu definir uma demanda de potência que minimizasse os custos com energia elétrica e os custos totais do planejamento agregado de produção. O cenário atual e o cenário proposto foram comparados e o desenvolvimento do modelo foi analisado.

**Palavras-chaves:** Planejamento e controle da produção. Planejamento agregado da produção. Energia elétrica. Demanda de potência.

## ABSTRACT

MATOS, Camila. **An model to integration the electric energy cost and the potency demand to the aggregate production planning.** 2019. 97 p. Thesis (Master's Degree in Production Engineering) - Federal University of Technology - Paraná, Ponta Grossa, 2019.

The constant increase in electricity tariffs as well the obligation of previous contracting of power demand by companies connected to the high voltage electric system, encourage the organizations to improve the energy planning in their production processes. In addition, market uncertainties indicate that only stochastic methods are insufficient to forecast future production demand. From this context, the objective of this work is to propose a model that integrates the cost with electric energy and demand power to the aggregate production planning, considering the uncertainties in the market. The model was applied in a food industry, in a family of crispy french fries. From the data collected, a demand forecast was carried out for later realization of the aggregate planning, using the Holt-Winter forecast model. In sequence, the market uncertainties were treated by the fuzzy method which was applied from the analysis of the demand forecast by the decision maker. Before the modeling of the aggregate planning, the new power demand was calculated and, finally, the verification of the solution of the model was done. The results showed that the suggested model was able to define a power demand that minimized the costs with electric energy and the total costs of the aggregate production planning. The current scenario and the proposed scenario were compared and the model development was analyzed.

**Keywords:** Production planning and control. Aggregate production planning. Electric energy. Demand power.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral das atividades do PCP .....	19
Figura 2 - Etapas do modelo proposto .....	35
Figura 3 - Processo de produção das batatas.....	36
Figura 4 - Mapa mental de discussões.....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Oferta de eletricidade no Brasil .....	28
Gráfico 2 - Curva típica de fornecimento de potência de uma concessionária.....	30
Gráfico 3 - Demanda de potência elétrica contratada e utilizada .....	48
Gráfico 4 - Histórico de produção de batata .....	51
Gráfico 5 - Correlograma.....	51
Gráfico 6 - Componentes de tendência e sazonalidade .....	52
Gráfico 7 - Modelo aditivo e multiplicativo de Holt-Winters .....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros considerados no planejamento agregado de produção .....	20
Quadro 2 - Variáveis de decisão consideradas no planejamento agregado de produção .....	21
Quadro 3 - Trabalhos relacionados a aplicação de modelos para suporte do PA.....	23
Quadro 4 - Trabalhos relacionados a redução de energia elétrica.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações dos modelos de Holt-Winters .....	27
Tabela 2 - Equações dos modelos de desempenho .....	27
Tabela 3 - Custos demanda de potência.....	50
Tabela 4 - Medidas de desempenho dos modelos.....	54
Tabela 5 - Previsão de demanda de produção.....	54
Tabela 6 - Variáveis linguísticas .....	55
Tabela 7 - Respostas do decisor.....	55
Tabela 8 - Nova previsão de demanda de produção.....	56
Tabela 9 - Custos da Cooperativa.....	56
Tabela 10 - Plano agregado do cenário atual.....	59
Tabela 11 - Plano agregado com a nova demanda de potência .....	60
Tabela 12 - Plano agregado cenário proposto .....	61

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CE	Consumo específico de energia
CV	Ciclo de Vida
EE	Eficiência Energética
FC	Fator de carga de instalação
GD	Geração distribuída
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PAP	Planejamento Agregado de Produção
PC	Planejamento da Capacidade
PCP	Planejamento e Controle da Produção
PL	Programação Linear
PMP	Plano Mestre de Produção

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo Geral .....	15
1.2.2 Objetivos Específicos .....	15
1.3 JUSTIFICATIVA.....	15
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	16
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	18
2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO.....	18
2.2.1 Planejamento Agregado da Produção.....	19
2.2.2 Técnicas de Previsão de Demanda de Produção .....	25
2.2.2.1 Medidas de desempenho dos modelos .....	27
2.3 USO DA ENERGIA ELÉTRICA .....	28
2.3.1 Geração.....	28
2.3.2 Consumo .....	29
2.3.3 Modelos que Incluem Energia Elétrica no Planejamento da Produção .....	32
2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	33
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
3.1 ETAPA 1 - DEFINIÇÃO LOCAL DA PESQUISA .....	36
3.2 ETAPA 2 - IDENTIFICAÇÃO DA FAMÍLIA DE PRODUTOS.....	36
3.3 ETAPA 3 - COLETA DE DADOS .....	37
3.4 ETAPA 4 - DEFINIÇÃO DA DEMANDA DE POTÊNCIA.....	37
3.5 ETAPA 4 - PREVISÃO DE DEMANDA .....	39
3.6 ETAPA 5 - ANÁLISE DO DECISOR.....	41
3.7 ETAPA 6 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO PLANEJAMENTO AGREGADO .....	42
3.8 ETAPA 7 - SOLUÇÃO DO PLANEJAMENTO AGREGADO .....	46
3.9 ETAPA 8 - VERIFICAÇÃO DO MODELO (ANÁLISE DE SENSIBILIDADE) .....	46
<b>4 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>47</b>
4.1 DADOS COLETADOS.....	47
4.3 PREVISÃO DE DEMANDA DE PRODUÇÃO.....	50

4.4 ANÁLISE DO DECISOR.....	54
4.5 MODELAGEM E SOLUÇÃO DO PLANEJAMENTO AGREGADO NA COOPERATIVA .....	56
4.6 VERIFICACAO DO MODELO .....	61
<b>5 DISCUSSÕES.....</b>	<b>64</b>
<b>6 CONSIDERACOES FINAIS .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE A - Dados Coletados.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE B - Comandos utilizados no Software R Project.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE C - Tabelas lógica Fuzzy .....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE D - Tabela do Cálculo da Demanda de Potência .....</b>	<b>85</b>
<b>APENDICE E - Resolução do Planejamento Agregado no Solver.....</b>	<b>87</b>
<b>APENDICE F - Relatórios de Sensibilidade.....</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com uma análise das tendências recentes das indústrias transformadoras, a gestão de energia é enfrentada como um desafio pelas indústrias, devido ao fato econômico dos custos crescentes de energia (RAGER *et al.*, 2015). Segundo o Ministério das Minas e energia (MME, 2018), em fevereiro de 2018, a classe industrial apresentou um aumento de 4,9% de energia elétrica em relação ao ano de 2017.

O aumento do consumo de energia elétrica consequentemente impulsiona as indústrias a buscarem a eficiência energética em seus processos produtivos, uma vez que a eficiência energética na produção possui potencial suficiente para reduzir o consumo de energia elétrica e também as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas à energia (BIEL e GLOCK, 2016).

As indústrias por vezes enfrentam dificuldades para otimização do uso de energia pela falta de ferramentas de planejamento necessárias para se construir um planejamento e controle da produção consciente de energia (SOBOTTKA, KAMHUBER e SIHN, 2017). Uma alternativa para as empresas otimizarem esse uso de energia é, por meio, do planejamento e controle da produção (PCP).

O PCP é responsável por determinar o que a empresa irá produzir, quanto, quem, e de que forma. Ao mesmo tempo realiza também o controle, monitorando o desempenho da produção a fim de garantir que o planejado seja executado da melhor forma possível corrigindo desvios ou erros que possam surgir (TUBINO, 2007). No PCP, existe o planejamento agregado de produção, que permite a identificação dos dados e a quantidade de cada produto que devem ser feitos para atender às flutuações futuras da demanda. Portanto, seu objetivo é desenvolver um plano de produção agregada que possa evitar flutuações na demanda, que são diretamente responsáveis por excessos ou escassez dos recursos disponíveis na organização (FILHO, CEZARINO E RATTO, 2010).

Quando o planejamento de produção possui objetivos relacionados a energia, tais como a minimização do consumo de energia, custo da energia ou emissões de gases com efeito estufa, ele ganha uma dimensão também ambiental. Em comparação com as abordagens que buscam melhorar tecnologicamente a eficiência energética dos sistemas de produção, os modelos de planejamento eficientemente energéticos têm se tornados cada vez mais populares na prática, pois sua implantação



geralmente não está ligada a grandes investimentos (BIEL e GLOCK, 2016).

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

A partir da revisão bibliográfica realizada sobre o tema aqui tratado, nota-se que o desafio do planejamento agregado é combinar a taxa de produção, nível de mão de obra e dos estoques disponíveis de modo que minimize os custos e atenda a demanda prevista. Sob o ponto de vista do uso de energia, o desafio é alcançar o nível ótimo de produção considerando tanto o consumo de energia elétrica como a demanda de potência a ser contratada. Desta forma, este trabalho busca responder a seguinte questão de pesquisa:

*De que modo a energia elétrica e a demanda de potência podem ser consideradas para a redução de custos no planejamento agregado de produção?*

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo que integre o custo com o consumo de energia elétrica e a demanda de potência ao planejamento agregado de produção de uma indústria.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir uma nova demanda de potência a ser contratada para a produção;
- Elaborar o modelo de planejamento agregado integrando a demanda de potência e o custo com energia elétrica;
- Resolver o modelo elaborado com a definição dos valores ótimos de produção que minimizem os custos de produção;
- Comparar o cenário atual com o proposto pelo modelo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O setor industrial é o maior consumidor de energia, representando mais de um terço do consumo de energia primária em todo o mundo (CHOI e XIROUCHAKIS,

2014). Com os crescentes custos de energia elétrica nos últimos anos, torna-se extremamente importante considerá-los durante o processo de planejamento da produção (ZHANG *et al.*, 2017). Sob o ponto de vista do produtor, a redução de custo do processo produtivo pode tornar o produto mais competitivo no mercado. Dentro de um contexto social, a redução dos custos com eletricidade no setor produtivo oportuniza a oferta de produtos mais acessíveis à população.

Outro aspecto importante sob o ponto de vista dos consumidores, é o planejamento energético das indústrias. A Resolução ANEEL 414/2010 determina que os consumidores de energia elétrica em alta tensão devem contratar previamente uma demanda de potência a ser utilizada durante todo o período do contrato. Isso exige das empresas um planejamento prévio da produção de tal modo que atenda o valor de demanda de potência a ser contratado. Desse modo, torna-se fundamental unir o planejamento da produção com o planejamento energético.

Já do ponto de vista da oferta de energia elétrica, o planejamento por parte da demanda contribui também para o planejamento do sistema elétrico, tanto geração, transmissão e distribuição. Um planejamento prévio das indústrias permite investimentos para a construção de usinas elétricas, bem como redes de transmissão e distribuição de energia (COPEL, 2005).

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A partir dos objetivos traçados, essa pesquisa delimita-se quanto ao setor econômico, pois será desenvolvida em uma indústria, limitada geograficamente na região sul do Brasil. Quanto ao ramo de atividade, trata-se de uma produção agroindustrial. Quanto ao tipo de atividade, enquadra-se em uma única família de produtos, com perfil específico de produção de batata frita.

A realização de um trabalho sobre a temática proposta, objeto de pesquisa, tem como foco o planejamento agregado. O campo de estudo desta pesquisa em Engenharia de Produção está inserido na linha de pesquisa de Produção e uso eficiente de energia, que trata da redução do custo com energia elétrica por meio de ajustes de parâmetros no processo de produção. O PCP é muito complexo em razão de englobar toda a produção em três níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional (TUBINO, 2009). Desse modo, optou-se por trabalhar no nível tático, abordando o planejamento agregado de produção.

Particularmente, este estudo foi realizado em um ambiente com classificação de produção sob encomenda. De acordo com Land e Gaalman (1996) este sistema é dinâmico e possui falhas, como falta de operadores e materiais, além de existir baixa aderência nas ordens de produção em razão dos prazos de entrega pré-estabelecidos (CORTI, POZZETTI e ZORNINI, 2006).

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo aborda a contextualização do tema, trazendo o problema de pesquisa, bem como os objetivos gerais, e específicos, justificativa, e delimitação da pesquisa. No segundo encontra-se a revisão de literatura seguido do terceiro capítulo que detalha o procedimento metodológico para a construção do modelo proposto. O quarto apresenta a aplicação do modelo enquanto o quinto capítulo apresenta a discussão dos resultados. E por fim tem-se as considerações finais seguida das referências bibliográficas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo abordará o referencial teórico baseado em pesquisas publicadas em periódicos, dissertações e livros descrevendo conceitos de planejamento e controle da produção, uso de energia elétrica, planejamento agregado da produção e modelos matemáticos.

### 2.1 SISTEMAS DE PRODUÇÃO

O sistema de produção pode ser definido como tudo aquilo que transforma algo de entrada (input) em alguma coisa como saída (output) (SIPPER e BULFIN, 1997). Para Buffa e Sarin (1987) ele é definido como o meio onde os recursos de entrada (input) são transformados em bens e serviços úteis como saída (output).

Fernandes *et al.* (2007), afirmam que estes sistemas formam a base para a construir e aumentar a força econômica de um país, assim como relevantes na sociedade moderna. Assim, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) se torna essencial para uma empresa, pois ele gerencia o fluxo de materiais do sistema de produção a partir do fluxo de informações.

Entender os sistemas produtivos é importante para determinar os métodos, ferramentas e técnicas que melhor se aplicam nos diferentes ambientes de produção. Possebon (2013) relata que ao longo de diversas pesquisas e estudos, apareceram algumas formas de classificação sendo: i) pelo grau de padronização; contínuo ou intermitente; e pela resposta à demanda. A estratégia de resposta à demanda possui quatro principais classificações: i) MTS - *Make to stock*, ou produção para estoque; ii) ATO - *Assembly to order*, ou montagem sob encomenda; iii) MTO - *Make to Order*, ou produção sob encomenda e iv) ETO - *Engineering to order*, ou projeto sob encomenda.

### 2.2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

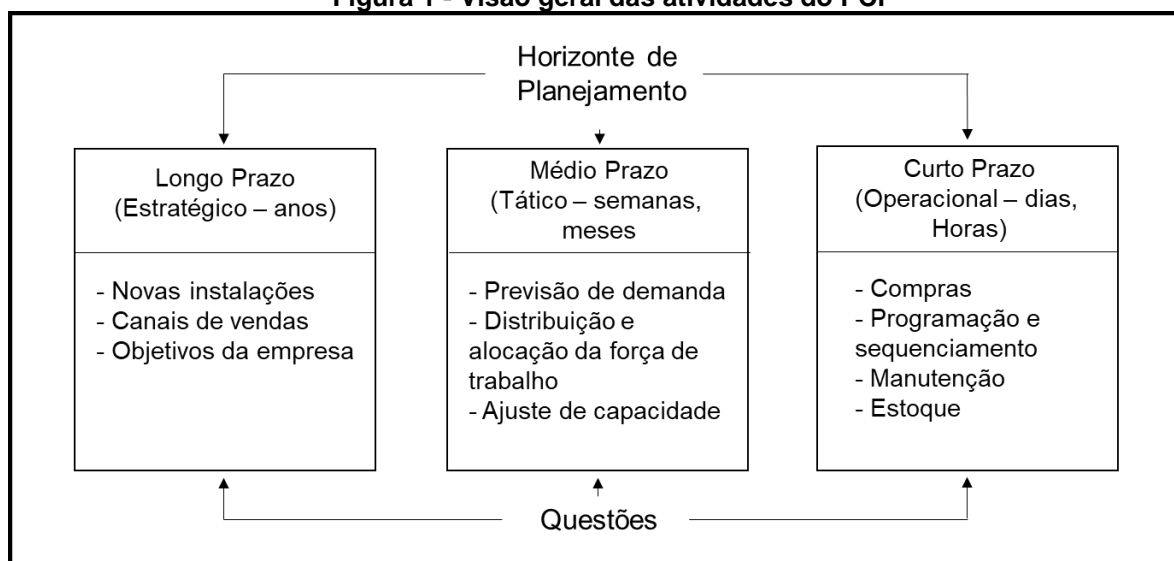
O conceito de Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem se modificado à medida que surgem inovações tecnológicas e novas tendências de mercado, fazendo com que novos produtos sejam idealizados (PAPALARDO, 2016). Russomano (1995) relata que o PCP é uma função que apoia e coordena as várias atividades de acordo com os planos de produção, de modo que os programas

preestabelecidos possam ser atendidos com eficiência e economia. Já Slack (1993) define que a função do PCP é garantir que a produção aconteça conforme o planejado, produzindo bens e serviços, de maneira eficaz e eficiente.

É a partir do PCP que as empresas conseguem garantir que suas decisões táticas e operacionais sobre 'o que', 'quando', 'quanto', 'como' e 'com o quê' produzir e comprar, sejam adequadas ao seu planejamento estratégico e conseqüentemente também aos objetivos da empresa (SIPPER E BULFIN Jr., 1998). Feng *et al.* (2011) afirma que o PCP é particularmente importante nas indústrias tradicionais de fabricação de processos, uma vez que os custos que envolvem matéria prima, consumo de energia e manutenção da linha de produtos são muito grandes. O segredo está em executar uma política de gerenciamento de produção eficaz e otimizar o método de planejamento de produção.

Anthony (1965) classifica as atividades de planejamento em uma organização em três níveis hierárquicos: i) estratégico; ii) tático; e iii) operacional. A Figura 1 ilustra a visão geral das atividades do PCP, dentro destes três níveis.

**Figura 1 - Visão geral das atividades do PCP**



Fonte: Nahmias (1995)

O nível estratégico lida com planejamento de longo prazo, no qual são definidas as metas gerais da empresa e novas tecnologias e novos mercados são planejados. Enquanto os níveis tático e operacional concentram-se, respectivamente, no médio e no curto prazo, tendo como meta planejar e programar o uso dos recursos, agregando valor às atividades produtivas da organização (ANTHONY, 1965).

### 2.2.1 Planejamento Agregado da Produção

O Planejamento Agregado da Produção (PAP) é um método eficaz que determina os níveis de produção, estoque e mão-de-obra para atender uma demanda de acordo com determinada capacidade de produção e recursos. Geralmente, este planejamento é realizado em um horizonte de 3 a 18 meses (ENTEZAMINIA, HEYDARI e RAHMANI, 2016). Mehdizadeh, Niaki e Hemati (2017) definem o PAP como uma atividade operacional que fornece um plano agregado para processos de produção em um intervalo de tempo médio. Ele apresenta a quantidade ideal de produção e o tempo de produção de mercadorias, peças, materiais e outros recursos para minimizar o custo operacional total da organização.

De acordo com Mehdizadeh, Niaki e Hemati (2017) o objetivo do PAP é definir os níveis gerais de saída para enfrentar demandas flutuantes ou incertas, bem como fornecer suprimentos. Cristou, Lagodimos e Lycopoulou (2007), complementam dizendo que ele objetiva produzir o plano mensal mais barato para cada linha de modo que o nível de serviço ao cliente seja maximizado, minimizando o número de turnos extras necessários para a produção e maximizando a qualidade do produto.

O PAP gera uma programação mensal detalhada para cada linha de produção em termos de quantidades mensais de cada produto que cada linha irá produzir (CRISTOU, LAGODIMOS E LYCOPOULOU, 2007). São determinados, o número de itens a serem terceirizados, a quantidade de horas extras de trabalho, o número de trabalhadores a serem contratados e demitidos e o nível de estoque a ser mantido em estoque e a ser acumulado em cada período, todos considerados como variáveis de decisão (MEHDIZADEH, NIAKI E HEMATI, 2017).

Os principais insumos necessários para o PAP, considerados como parâmetros, consistem em informações sobre os recursos e as instalações disponíveis, previsão de demanda para o período de planejamento e os custos de diferentes alternativas e recursos. Estes custos, por sua vez, envolvem o estoque, o pedido e o custo de produção por meio de várias alternativas de produção, como horas extras, subcontratação e pedidos em atraso (MEHDIZADEH, NIAKI E HEMATI, 2017). Desta forma, os principais parâmetros identificados, utilizados por diferentes autores em um planejamento agregado, estão apresentados no Quadro 1

**Quadro 1 - Parâmetros considerados no planejamento agregado de produção**

<b>Parâmetros</b>	<b>Citado por</b>
Custo unitário de produção do produto no período	(MODARRES e IZADPANA, 2016); (FILHO, CEZARINO e RATO, 2010); (ENTEZAMINIA,

	HEYDARI e RAHMANI, 2016); (MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017)
Custo do pedido por unidade de produto	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016); (MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017)
Custo de transporte por unidade de produto	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016)
Consumo de energia elétrica para produzir cada unidade de produto	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016); CHATUVERDI (2017)
Custo de energia elétrica no período	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016); (GOLARI, FAN e JIN. 2017)
Custo de mão de obra	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010); (MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017); (GOLARI, FAN e JIN. 2017)
Custo de hora extra	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010); (MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017)
Quantidade de consumo de energia	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016); (GOLARI, FAN e JIN. 2017)
Volume máximo de produção do produto	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016); (ENTEZAMINIA, HEYDARI e RAHMANI, 2016)
Demanda do produto	(MODARRES e IZADPANAHA, 2016); (ENTEZAMINIA, HEYDARI e RAHMANI, 2016); (MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017); (GOLARI, FAN e JIN. 2017)
Número total de produtos	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Número de dias úteis	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Número de dias especiais	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Horas regulares em um dia de trabalho	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Horas extras permitidas em dias úteis	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010); (ENTEZAMINIA, HEYDARI e RAHMANI, 2016)
Horas extras permitidas em dias especiais	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Mão de obra necessária	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010); (ENTEZAMINIA, HEYDARI e RAHMANI, 2016)
Estoque de segurança	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Estoque inicial	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Nível de estoque final	(FILHO, CEZARINO e RATTO, 2010)
Custo de contratação	(MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017)
Custo de demissão	(MEHDIZADEH, NIAKI e HEMATI, 2017)

Fonte: Autoria própria

Assim como os parâmetros, foram identificadas também seis variáveis de decisão (Quadro 2) utilizadas por diferentes autores em um planejamento agregado.

**Quadro 2 - Variáveis de decisão consideradas no planejamento agregado de produção**

Variáveis de decisão	Citado por
Volume de produção do produto	(Modarres e Izadpanah, 2016); (Filho, Cezarino e Ratto, 2010); (Mehdizadeh, Niaki e Hemati, 2017); (Golari, Fan e Jin. 2017)
Nível de pedido pendente do produto	(Modarres e Izadpanah, 2016); (Mehdizadeh, Niaki e Hemati, 2017)
Nível de estoque do produto	(Modarres e Izadpanah, 2016); (Filho, Cezarino e Ratto, 2010); (Golari, Fan e Jin. 2017)
Energia consumida no processo	(Modarres e Izadpanah, 2016); (Golari, Fan e Jin. 2017)
Número de trabalhadores	(Filho, Cezarino e Ratto, 2010)
Horas extras	(Filho, Cezarino e Ratto, 2010)

Fonte: Autoria própria

Stevenson (2001) apresenta alguns passos para elaborar o planejamento agregado, sendo:

- 1) Determinar a demanda para cada período;
- 2) Determinar as capacidades para cada período;
- 3) Identificar políticas da empresa ou departamentais pertinentes;
- 4) Determinar os custos unitários relativos a horas normais, horas extras, subcontratação, manutenção dos estoques, pedidos com programação de atendimento estendida, demissões, ou outros fatores que afetam os custos de forma relevante;
- 5) Desenvolver planos alternativos e calcular o custo de cada plano;
- 6) Sugerir planos viáveis, selecionar o plano que melhor atenda aos objetivos.

Para resolução do PAP, foram desenvolvidas técnicas e modelos desde a década de 1950 (SAKALLI, BAYKOÇ e BIRGOREN, 2010). Techawiboonwong & Yenradee (2002), complementam ao relatarem a possibilidade de se encontrar várias técnicas para essa resolução e que a escolha de uma técnica apropriada dependerá do nível de complexidade do modelo formulado.

Os modelos tradicionais de problemas de PAP podem ser classificados em seis categorias: i) programação linear (PL); ii) regra de decisão linear (RDL); iii) método de transporte; iv) abordagem do coeficiente de gestão; v) regra de decisão de busca (RDB); e vi) simulação (SAAD, 1982). Feng *et al.* (2011) complementa com mais três métodos: i) programação dinâmica; ii) tabelas de transporte; e iii) programação matemática de lógica difusa. Ao usar qualquer um dos modelos de planejamento, os objetivos e entradas do modelo são geralmente considerados como determinísticos, e os problemas só podem ser resolvidos se possuírem o único objetivo de minimizar o custo durante o período de planejamento (Wang e Liang, 2004).

Narasimhan, McLeavey e Billington (1995), relatam que o objetivo mais comum considerado no modelo matemático para o PA é a minimização do custo total no horizonte de planejamento. Rajaram e Karmarkar (2012), complementam dizendo que os modelos de PAP são normalmente formulados como programações lineares que minimizam os custos. Masoumeh, Mustapha e Daoud (2010) relatam que os modelos matemáticos tradicionais são determinísticos e podem resultar em planos de produção insatisfatórios caso tenha incertezas. As técnicas de modelos matemáticos, especialmente a programação linear (PL), devido a sua rigorosidade, flexibilidade e extensa capacidade de modelagem, tornaram-se um dos métodos mais amplamente explorados para planejamento e programação de processos (FLOUDAS e LIN, 2005).



De acordo com Arruda Junior (2014) estudos abordam a aplicação de modelos para suporte do planejamento agregado em sistemas reais desde a década de 1980. O Quadro 3 apresenta os modelos desenvolvidos e encontrados de 2008 à 2019.

**Quadro 3 - Trabalhos relacionados a aplicação de modelos para suporte do PA**

Autores	Sobre o estudo
Filho, Cezarino e Ratto (2010)	Apresentaram uma ferramenta computacional de apoio à decisão para planejamento agregado de produção, que foi baseado em uma planilha no Excel e no <i>software</i> solver. A ferramenta foi originalmente projetada para pequenas empresas em que o processo de produção segue um padrão de produção para estoque. Para fornecer um plano de produção ideal, a ferramenta manteve um modelo de otimização sequencial, estocástico e linear para representar o problema. O modelo foi realizado com um horizonte de 12 meses, buscando a minimização dos custos totais de produção, considerando níveis de estoques, taxas de produção, horas extras, mão-de-obra regular e subcontratação. Em particular, o custo do estoque foi altamente influenciado pela flutuação da demanda ao longo dos períodos do horizonte de planejamento.
Feng <i>et al.</i> (2011)	Apresentaram um método de otimização voltado para indústrias de processos que objetivou minimizar os custos de estoque e otimizar a taxa de produção e a taxa de carga de balanceamento. Ao analisar os modelos de previsão de demanda, capacidade de produção de equipamentos e modelos de controle de manutenção, expuseram um método, com uma função objetivo, para obter a quantidade total de demanda de planejamento e o lead time de produção. Para verificar a eficácia do método apresentado, realizaram um estudo de caso em uma planta farmacêutica com horizonte de planejamento de 12 meses. O método incluiu custos mínimos de estoque, taxa de carga de produção ideal e taxa de carga de saldo de produção. Os resultados indicaram que a precisão da previsão de demanda melhorou, a diferença entre a produção e as vendas foi reduzida, e o nível médio de estoque e os custos de estoque também diminuíram significativamente.
Kopanos, Georgiadis e Pistikopoulos (2013)	Propuseram um modelo misturando programação linear mista/discreta/contínua com base na definição de famílias de produtos em uma produção de iogurtes. O problema em questão é principalmente focado no estágio de empacotamento, ao passo que as restrições de tempo e capacidade são impostas com relação à etapa de lote para assegurar a geração de planos de produção viáveis. O modelo focou na minimização dos custos de estoque, custos operacionais, custos de preparação de receitas em lote, custos unitários de utilização, custos de mudança de famílias e custos de produção externos. Para aplicação do modelo, realizaram três estudos de casos, sendo cada estudo considerando uma meta de produção diferente. O modelo indicou os melhores planos e horários de produção para 5 dias de produção (segunda à sexta) considerando o conjunto completo de custos e restrições operacionais e disponibilidade de recursos trabalhistas. As decisões de tempo e sequenciamento são tomadas para famílias de produtos, e não para produtos; reduzindo assim significativamente o tamanho do modelo.
Latifoglu, Belotti e Snyder (2013)	Apresentaram um modelo de otimização para o planejamento agregado de produção sob a suposição de que o fornecimento de eletricidade está sujeito a interrupções incertas causadas pela participação em contratos de carga interruptível. O objetivo do modelo foi de minimizar o custo da eletricidade utilizada na produção, fornecendo um plano de produção robusto que garantisse a satisfação da demanda em todos os possíveis cenários de interrupção. O modelo considerou o problema de nível operacional, produção agregada e planejamento de estoque

	<p>com a incerteza da oferta de eletricidade e a demanda determinística. Foram separadas as decisões de produção das decisões de interrupção, pois as primeiras pertencem à empresa industrial, enquanto as últimas pertencem ao varejista de energia elétrica. Foi desenvolvida uma heurística para encontrar uma solução viável do modelo, em que a mesma encontrou uma solução ótima para cada instância em 7 períodos. A estrutura de incerteza de interrupção permite que diferentes regras de contrato e regras operacionais sejam incorporadas ao problema de planejamento de produção simultaneamente, como por exemplo, limitar a produção na recuperação pós-interrupção ou proibir aumentos no nível de produção em alguns períodos.</p>
<p>Bilgen e Dogan (2015)</p>	<p>Abordaram um problema de planejamento de produção especificamente em uma indústria de laticínios. O sistema de produção possuía múltiplos estágios que consistia em recursos de processamento contínuo separados por tanques de armazenamento de capacidade finita. O problema foi formulado como um modelo de programação linear inteira mista que incorporou várias características distintivas da produção de laticínios, tais como produção em massa em múltiplos estágios, requisitos de vida útil, armazenamento intermediário, configurações, velocidades de recursos, limitações no tamanho mínimo e máximo do lote e a conservação do fluxo entre vários tanques. O objetivo do modelo foi de maximizar o lucro total a partir da determinação da quantidade de produtos intermediários, unidade de manutenção de estoque (SKUs) processados em vários recursos (produtos vendidos, vendas perdidas, tempos de espera). O modelo foi utilizado em 2 exemplos, sendo o primeiro com horizonte de planejamento de 3 semanas (15 dias) e o segundo com 7 dias. Como resultados, obtiveram a diminuição dos custos de vendas perdidos, o aumento da receita e o lucro total. Além disso, a capacidade adicional alterou o tempo de espera dos recursos e reduziu o estoque.</p>
<p>Kadambur e Kotecha (2015)</p>	<p>Realizaram uma comparação de um modelo matemático de programação linear inteira mista (MILP) e um algoritmo TLBO (algoritmo elitista de aprendizado baseado em aprendizagem) para determinar melhores planos de produção, e maximizar o lucro de uma indústria petroquímica. O problema a ser tratado foi de uma otimização combinatória para: i) determinar o tipo e a quantidade de produtos que deveriam ser produzidos; ii) os processos a serem selecionados para produção; e iii) a produção. A estratégia proposta foi demonstrada em oito casos da literatura, em que o modelo categorizou 54 processos diferentes que produziam 24 produtos operando em três diferentes níveis de capacidade. Como resultado, obtiveram que a formulação do MILP, de acordo com a literatura, limita a quantidade máxima de produto que pode ser fabricada de um processo ao alto nível de produção desse processo, enquanto o algoritmo utilizado fornece uma considerável flexibilidade de modelagem, já que não exigem que as restrições estejam na forma de desigualdades explícitas ou de igualdades.</p>
<p>Izadpanahi e Modarres (2016)</p>	<p>Realizaram um modelo de programação linear com três funções objetivo, que minimizam o custo operacional, o custo energético e a emissão de carbono. Assume-se que existem vários tipos de energia que podem ser usados. Eles diferem quanto à quantidade de poluição, poder calorífico e custo. O modelo proposto foi aplicado à fábrica de fundição, produtora de uma ampla gama de produtos como alumínio, cobre e chumbo, que empregava diferentes máquinas e equipamentos de fabricação capazes de consumir vários tipos de combustíveis fósseis com diferentes quantidades de emissão de carbono. O objetivo era determinar os meios mais eficazes de satisfazer a demanda agregada prevista, ajustando as taxas de produção, os níveis de estoque, os pedidos em atraso e as outras variáveis controláveis. O modelo foi resolvido como um modelo de objetivo único, aplicando uma técnica de obtenção de metas e para superar os efeitos de</p>

	dados de entrada incertos, foi aplicado a abordagem de otimização robusta ao modelo. Essas funções objetivas buscaram minimizar os custos operacionais; custo de energia e emissão de carbono. Os autores concluíram que ao aumentar o nível de orçamento de incerteza, a quantidade de aumento para o custo de energia elétrica é muito maior em comparação com outros custos de função de objetivo.
Mehdizadeh, Niaki e Hemati (2017)	Desenvolveram um modelo de otimização biobjetivo para um problema de planejamento agregado com efeito de aprendizado do trabalho e deterioração da máquina. O primeiro objetivo maximiza o lucro e o segundo minimiza os custos associados a reparos e deterioração da máquina. O objetivo do modelo foi de obter os níveis adequados de taxas de produção em níveis regulares e de horas extras, estoque e escassez, níveis de contratação e de demissão dos trabalhadores e as quantidades de subcontratados. Para validar a formulação matemática do modelo, o mesmo foi convertido em um modelo de objetivo único usando o método de programação de objetivo fuzzy, baseado em quais experimentos computacionais são realizados em um conjunto de instâncias aleatórias de pequeno porte resolvidas pelo <i>software</i> LINGO.

**Fonte: Autoria própria**

A partir do Quadro 3 é possível constatar que os estudos foram desenvolvidos todos com objetivos similares, o de otimizar algum fator, por exemplo, minimização de energia elétrica, minimização dos custos totais de produção, custos de estoques, maximização do lucro ou determinar melhores planos de produção. Os locais de aplicações são variados: pequenas empresas; laticínio, indústria de fundição de aço, iogurtes e farmacêutica.

Em relação ao tempo de planejamento realizado, os trabalhos abordam de 5 dias até 12 meses. Dentre esses trabalhos, observa-se que tanto em 2010 com o decorrer dos anos até 2017, os modelos matemáticos continuam sendo utilizados como suporte para o planejamento agregado, envolvendo programações lineares mistas, discretas e contínuas; multiobjetivos e com auxílio de *softwares* para as resoluções.

### 2.2.2 Técnicas de Previsão de Demanda de Produção

A previsão de demanda pode ser conduzida por meio de diversos métodos que vão desde o julgamento, intuição, metas, passando por fatores macroeconômico, até técnicas de previsão baseada em dados passados (MANCUZO, 2013). Para sua realização com precisão, é necessário subjugar alguns itens: i) conhecer os produtos e mercado consumidor; ii) identificação da sazonalidade; iii) componentes de tendência e; iv) fatores cíclicos e promocionais (ROSSETO *et al.*, 2011) (LIMA, 2013).

Peinado (2007) relata que as técnicas de previsão de demanda podem ser divididas em quatro grandes grupos principais de modelos, sendo: i) qualitativos; ii) composição de séries temporais; iii) previsão causais; e iv) simulação da demanda. Por outro lado, Tubino (2009) acredita que elas se subdividem em dois grupos, sendo em qualitativas e quantitativas. O modelo a ser abordado neste estudo é o de séries temporais, pois segundo Ehlers (2007), o modelo possui as seguintes características: i) descrever as propriedades das séries, caracterizando o padrão da tendência, a existência de variações sazonais ou alterações estruturais; ii) utilizar a variação em uma série para a explicação de posteriores séries; iii) prever demandas futuras com base em dados passados; controle de processos, como por exemplo, controle estatístico de qualidade. Dentro deste modelo, destacam-se como principais métodos de previsão de demanda baseado em séries temporais as médias móveis simples, ponderada e exponencial e o método de Holt-Winters.

O método Holt-Winters trata-se de uma extensão do modelo de Holt (1957) desenvolvida por Winter (1960) e é muito utilizado para os cálculos de previsões em séries temporais apresentam variações, sazonalidades, tendências (PEINADO; GRAEMI, 2007). Além disso, ele apresenta um tipo de suavização exponencial tripla, e isso tem a vantagem importante de ser fácil de atualizar à medida que novos dados se tornam disponíveis enquanto outros métodos, tem-se que a cada dado novo que se torna disponível é necessário o recálculo dos fatores sazonais a partir do zero (LAWTON, 1998) (NAHMIAS, 2009).

Nahamias (2009) relata que este método pode ter duas abordagens distintas, sendo a multiplicativa e a aditiva, sendo diferenciadas principalmente pela atuação dos índices sazonais. O Tabela 1 demonstra as Equações (1), (2), (3) e (4) que transcrevem as fórmulas para a aplicação do modelo aditivo e as Equações (5), (6), (7) e (8) transcrevem as fórmulas para a aplicação do modelo multiplicativo.

Tabela 1 - Equações dos modelos de Holt-Winters

	Holt-Winters Aditivos	Holt-Winters Multiplicativos
<b>Nível</b>	$L = \alpha(Y_t - S_{t-s}) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1})$ (1)	$L = \left(\alpha \frac{Y_t}{S_{t-s}}\right) + (1 - \alpha)(L_{t-1} + b_{t-1})$ (5)
<b>Tendência</b>	$b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$ (2)	$b_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$ (6)
<b>Sazonalidade</b>	$S_t = \gamma(Y_t - L_t) + (1 - \gamma)S_{t-s}$ (3)	$S_t = \gamma\left(\frac{Y_t}{L_t}\right) + (1 - \gamma)S_{t-s}$ (7)
<b>Previsão</b>	$F_{t+m} = (L_t + b_t m)S_{t-s+m}$ (4)	$F_{t+m} = L_t + b_t m + S_{t-s+m}$ (8)

Onde:

S = comprimento da sazonalidade

$L_t$  = nível da série

$b_t$  = tendência

$S_t$  = componente sazonal

$Y_t$  = valor observado

$F_{t+m}$  = representa a previsão para o período  $m$  adiante

$\alpha, \beta, \gamma$  = parâmetros exponenciais alisadores, do nível, da tendência e da sazonalidade, respectivamente.

Fonte: Winter (1960)

A abordagem aditiva é comum na utilização em séries temporais em que a amplitude da variação sazonal permanece constante durante os ciclos enquanto a multiplicativa destina-se a séries temporais que tem aumento na amplitude do ciclo sazonal com o tempo (NAHMIAS, 2009).

#### 2.2.2.1 Medidas de desempenho dos modelos

Para avaliar o desempenho e precisão dos métodos de previsão são utilizadas algumas formas, dentre elas, encontra-se as medidas de erros (CHIEN; CHEN; PENG, 2010). Estas podem ser: Média absoluta dos erros (MAE) Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), e Média absoluta percentual do erro (MAPE) (WERNER E RIBEIRO, 2006). A Tabela 2, apresenta as equações (9), (10) e (11) de cada um destes modelos.

Tabela 2 - Equações dos modelos de desempenho

Modelo	Equação
MAE (TUBINO, 2009)	$MAE = \frac{\sum   \text{Datual} - \text{Dprevista}  }{n}$ (9)
REQM (TRATAR; MOJŠKERC; TOMAN, 2016)	$REQM = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Datual} - \text{Dprevista})^2}}{n}$ (10)
MAPE (CHIEN; CHEN; PENG, 2010)	$MAPE = \sum_{t=1}^n \frac{  \text{Datual} - \text{Dprevista}  }{\text{Datual}} \times \frac{1}{n}$ (11)

Onde:

Datual = demanda real ocorrida no período

Dprevista = demanda prevista no período

n = número de períodos

Fonte: Autoria própria

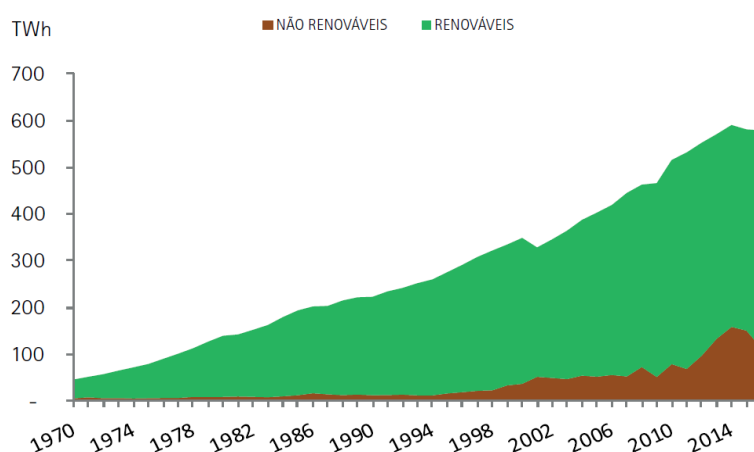
O erro é utilizado para auxiliar na escolha do modelo de previsão, ou seja, quanto menor o erro, mais precisa se torna a previsão. Desta forma, os métodos que possuem os menores erros, são os indicados para a elaboração da previsão (CHIEN; CHEN; PENG, 2010).

## 2.3 USO DA ENERGIA ELÉTRICA

### 2.3.1 Geração

A energia elétrica desempenha um papel fundamental em todos os setores, tais como industrial, residencial, público, rural, comercial e de serviços. No Brasil, a oferta de energia elétrica vem aumentando, conforme mostra o Gráfico 1 (MME, 2018).

**Gráfico 1 - Oferta de eletricidade no Brasil**



Fonte: MME (2018)

No mês de março de 2018 a capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu 159.058 MW, considerando todas as fontes de geração - hidráulica, termo, eólica, solar e nuclear - e incluindo também a geração distribuída. Em comparação com o mesmo mês do ano anterior, houve um acréscimo de 7.126 MW, sendo 3.251 MW de geração de fonte hidráulica, 439 MW de fontes térmicas, 2.174 MW de fonte eólica e 1.261 MW de fonte solar (MME, 2018).

A geração distribuída fechou o mês de março de 2018 com 304 MW instalados em 25.134 unidades, representando 0,2% da matriz de geração de energia elétrica. As fontes renováveis representaram 81,7% da capacidade instalada de geração de energia elétrica brasileira em março de 2018 - Hidráulica + Biomassa + Eólica + Solar

(MME, 2018). Considerando o tempo e o valor para investimento em geração de energia elétrica, é importante uma gestão eficiente para garantir o abastecimento. A chave para isso é ter conhecimento preciso das demandas futuras de eletricidade, planejamento preciso da capacidade, programação e operações dos sistemas de energia (CHEN, LO e DO, 2017).

### 2.3.2 Consumo

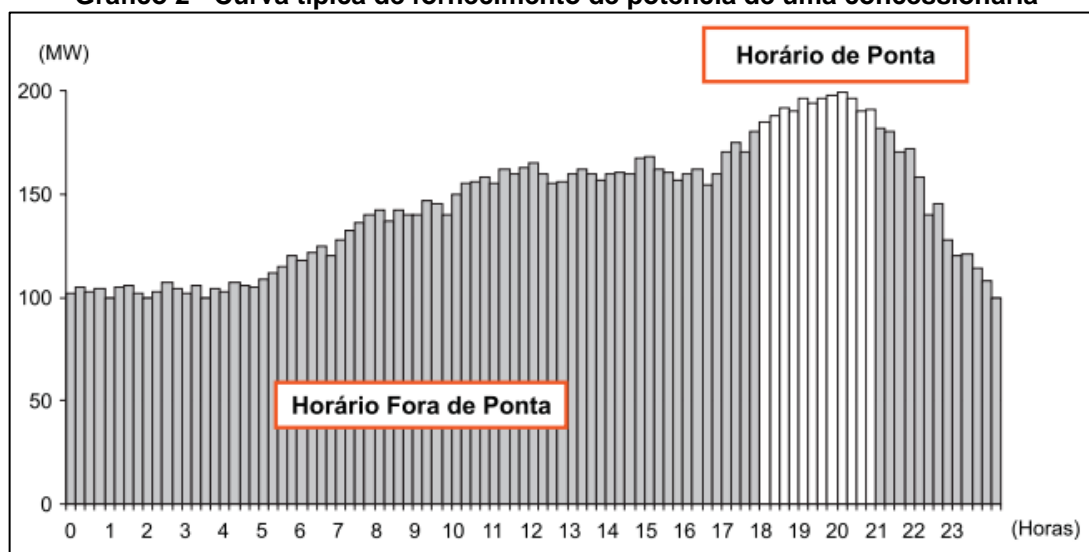
O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida da sociedade. Este consumo reflete tanto no ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto na capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente. Outra variável que determina o consumo de energia é o crescimento da população - indicador obtido tanto pela comparação entre as taxas de natalidade e mortalidade quanto pela medição de fluxos migratórios (IPEA, 2008).

No Brasil, em 2017, o consumo de energia elétrica atingiu 526,2 TWh, considerando autoprodução e acrescido das perdas de 15,7% no sistema elétrico. As classes industrial e residencial apresentaram aumento de 4,9% e 1,9%, respectivamente, nesse período, justificado pela reclassificação de parte do consumo, antes considerado nas perdas e diferenças, para estes segmentos (MME, 2019).

O consumo de eletricidade é maior entre 18h e 21h, o chamado horário de ponta, conforme mostra o gráfico da Fig.3. O horário de ponta é o período definido pela agência reguladora ANEEL - Agência Nacional de Energia elétrica - Na sua Resolução 414/2010, como sendo o período composto por três horas diárias consecutivas, exceto aos sábados, domingos e os feriados nacionais. O horário fora de ponta é o período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

No Gráfico 2 é possível visualizar um exemplo desses horários definidos pela ANEEL em virtude, principalmente, da capacidade de fornecimento que concessionária de energia elétrica apresenta. A curva de fornecimento de energia elétrica é típica de uma concessionária, onde o maior valor de demanda ocorre geralmente no horário de ponta (VIANA *et al.*, 2012).

**Gráfico 2 - Curva típica de fornecimento de potência de uma concessionária**



Fonte: VIANA *et al.* (2012)

Para desincentivar o uso de eletricidade no horário de ponta pelos consumidores de alta tensão, o agente regulador - ANEEL - impõe tarifas mais caras nesse horário. A fatura de energia elétrica é composta por duas modalidades AZUL e VERDE. Os consumidores alimentados em 69kV ou mais são tarifados somente na modalidade AZUL enquanto os demais podem optar por AZUL ou VERDE, a que for mais conveniente ao consumidor (ANEEL, 2010).

Na tarifa AZUL e na VERDE o consumidor paga tarifa diferenciadas de energia elétrica no horário de ponta e fora de ponta. Os consumidores ainda são obrigados a contratar com bastante antecedência uma demanda de potência elétrica. Enquanto na modalidade AZUL existe tarifa diferenciada pela demanda de potência contratada na ponta e fora de ponta, na modalidade VERDE a tarifa de demanda de potência é única, podendo ser consumida tanto na ponta quanto fora (ANEEL, 2010).

A obrigatoriedade contratação prévia de demanda de potência elétrica exige da empresa um forte planejamento para que a concessionária de energia elétrica também possa se planejar e entregar a potência contratada. Assim, o consumidor paga pela demanda de potência contratada mesmo que não use o total contratado. Em caso de exceder a demanda de potência contratada, o consumidor paga o dobro do preço normal pela diferença entre o valor medido e o contratado (ANEEL, 2010).

Quanto às unidades consumidoras, no Brasil elas são classificadas em dois grupos tarifários, em função do nível de tensão em que são atendidos, sendo o grupo de alta tensão (A) e o grupo de baixa tensão (B) (PROCEL - EPP, 2011). O grupo A possui tarifa binômica, atendendo os consumidores em alta tensão, acima de 2300



volts, como indústrias, shopping centers e alguns edifícios comerciais. Ele é subdividido de acordo com a tensão de atendimento, sendo (PROCEL - EPP, 2011):

- 1) Subgrupo A1 para o nível de tensão de 230 kV ou mais;
- 2) Subgrupo A2 para o nível de tensão de 88 a 138 kV;
- 3) Subgrupo A3 para o nível de tensão de 69 kV;
- 4) Subgrupo A3a para o nível de tensão de 30 a 44 kV;
- 5) Subgrupo A4 para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV e
- 6) Subgrupo AS para sistema subterrâneo.

O grupo B possui tarifa monômnia, atendendo unidades consumidoras com tensão abaixo de 2.300 volts (baixa tensão), como lojas, agências bancárias, pequenas oficinas, edifícios residenciais, grande parte dos edifícios comerciais e a maioria dos prédios públicos federais. Ele é subdividido de acordo com a atividade do consumidor, sendo (PROCEL - EPP, 2011):

- 1) Subgrupo B1 para residencial e residencial baixa renda;
- 2) Subgrupo B2 para rural e cooperativa de eletrificação rural;
- 3) Subgrupo B3 para as demais classes e
- 4) Subgrupo B4 para iluminação pública.

Na fatura mensal de energia elétrica para os consumidores de alta tensão (A), incidem tarifas pelo consumo de energia elétrica ativa e pela demanda de potência. Também podem incidir tarifas sobre o excedente de energia reativa e sobre a ultrapassagem de demanda. Seguem as definições (ANEEL, 2010):

- **Energia elétrica ativa:** Aquela que pode ser convertida em outra forma de energia, expressa em quilowatts-hora (kWh), a ser paga conforme valor medido pela concessionária ao final do período a ser faturado.
- **Demanda de potência contratada:** demanda de potência a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados previamente em contrato, e que deve ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).
- **Demanda de potência medida:** Maior demanda de potência, verificada por medição, integralizada em intervalos de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento.
- **Excedente de energia reativa:** Energia que circula entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir

trabalho, expressa em quilovolt-ampère-reactivo-hora (kVArh), a ser cobrada quando o Fator de Potência medido for inferior a 0,92.

- **Fator de potência:** É a relação entre a potência ativa (kW) e a potência total ou aparente (kVA).
- **Ultrapassagem de demanda:** Quando a demanda de potência medida excede em mais de 5% o valor contratado.
- **Tarifa de energia:** Valor em Reais por quilowatts-hora (R\$/kWh), com valores diferenciados no horário de ponta e fora de ponta.
- **Tarifa de demanda:** Valor em Reais por quilowatts (R\$/kW), com valores diferenciados no horário de ponta e fora de ponta.
- **Tarifa de ultrapassagem de demanda:** Valor em Reais por quilowatts (R\$/kW) equivalente ao dobro do valor da tarifa de demanda contratada, com valores diferenciados no horário de ponta e fora de ponta.

### 2.3.3 Modelos que Incluem Energia Elétrica no Planejamento da Produção

Este tópico apresenta os trabalhos desenvolvidos, relacionados a redução de energia elétrica, encontrados de 2007 à 2019 (Quadro 4).

**Quadro 4 - Trabalhos relacionados a redução de energia elétrica**

Autores	Trabalhos relacionados a redução de energia elétrica
Mouzon <i>et al.</i> (2007)	Utilizaram um modelo de programação matemática multiobjetiva com o intuito de desenvolver métodos operacionais que minimizassem a energia utilizada pelos equipamentos da produção. A metodologia baseou-se na constatação de que grandes quantidades de energia são consumidas por máquinas sem gargalo enquanto ficam ociosas e pode ajudar a reduzir o consumo total de energia enquanto otimiza outros objetivos de programação de produção. Desta forma, foram desenvolvidos algoritmos de controlador de máquina que reduziram eficientemente o consumo de energia, além de outros benefícios. Por fim, modelos de otimização multiobjetiva foram usados para minimizar o consumo de energia e o tempo total de conclusão e as soluções foram ditas “soluções não dominadas” que auxiliaram o controlador na escolha da melhor programação.
Choi e Xirouchakis (2015)	O estudo propôs uma definição com abordagem holística de planejamento de produção em um sistema de manufatura de reconfiguração com consumo de energia e efeitos ambientais. Uma metodologia foi definida a partir de manufatura reconfigurável. O modelo de planejamento de produção considerado foi desenvolvido em uma programação linear com a função multi-objetiva para minimizar o consumo de energia e maximizar o rendimento, sujeito a restrições lineares relativas a vários recursos e restrições para as demandas do cliente. Os resultados mostraram que houve uma aplicabilidade eficiente e prática da abordagem desenvolvida.

Santiago <i>et al.</i> (2015)	Apresentaram uma programação meta-heurística inspirado em HS (Harmony Search) para um problema de job-shop modificado sob um critério de maximização da eficiência energética e sujeito a múltiplas restrições. As avaliações deste sistema foram realizadas em sistemas reais de produção de guarda-chuva do Centro Irlandês de Pesquisa em Manufatura. Os resultados elucidam que o solucionador de busca harmônica proposto supera os otimizadores com poder de SA (Simulated Annealing) e GA (Algoritmo Genético), bem como a estratégia de alocação FCFS (First-Come-First-Served), com significância estatística.
Rager <i>et al.</i> (2015)	Foi apresentada uma abordagem de programação orientada para energia para um ambiente de máquina paralela. Desta forma, um cronograma (e a curva de carga resultante) foi planejado com um dia de antecedência e enviado para o fornecedor de eletricidade. Assim foi ajustado a curva para evitar picos durante partes do dia com uso intensivo de energia e reagendamentos porque quaisquer lacunas entre a curva de carga atualizada e real resultam em custos de penalidade, com o objetivo de minimizar os custos de penalidade por agendamento de trabalho. Os resultados mostraram que a abordagem de programação orientada para a energia foi capaz de aumentar a eficiência energética.
Zhang <i>et al.</i> (2017)	Foi proposto um novo modelo matemático para determinar o agendamento eficiente para minimizar consumo de energia e eletricidade para o problema flexível de agendamento da loja de trabalho em uma política de tempo de uso. Além disso, foi adicionado ao modelo a opção de seleção de velocidade, que representa a seleção de velocidades operacionais variáveis. Este estudo pode ser aplicado à indústria e ajudar os tomadores de decisão a desenvolver cronogramas de produção que podem reduzir não apenas o tempo, mas também os custos de eletricidade.
Chaturvedi (2017)	O estudo aborda um método gráfico baseado em insights que foi proposto para calcular a economia potencial em energia e custo de capital para múltiplas instalações que agregam planejamento de produção. Conceitos de EAF (fator de acessibilidade de energia) e CAF (fator de custo acessível) foram introduzidos na metodologia que mostrou ser eficaz, já que minimizou o consumo anual de energia do plano de produção e foi capaz de contabilizar o custo de capital. Diante dos resultados, os autores discutiram que quando o EAF e o CAF estão na mesma direção, então as decisões podem ser tomadas sem delonga, no entanto, se ambos estiverem em uma direção oposta, então a gerência deve tomar decisões de acordo com outras situações. Por fim, são apresentados dois exemplos ilustrativos da aplicabilidade do algoritmo em que mostraram reduções potenciais no consumo anual de energia para o planejamento de produção de duas instalações em comparação com o planejamento de produção de instalação única.

**Fonte: Autoria própria**

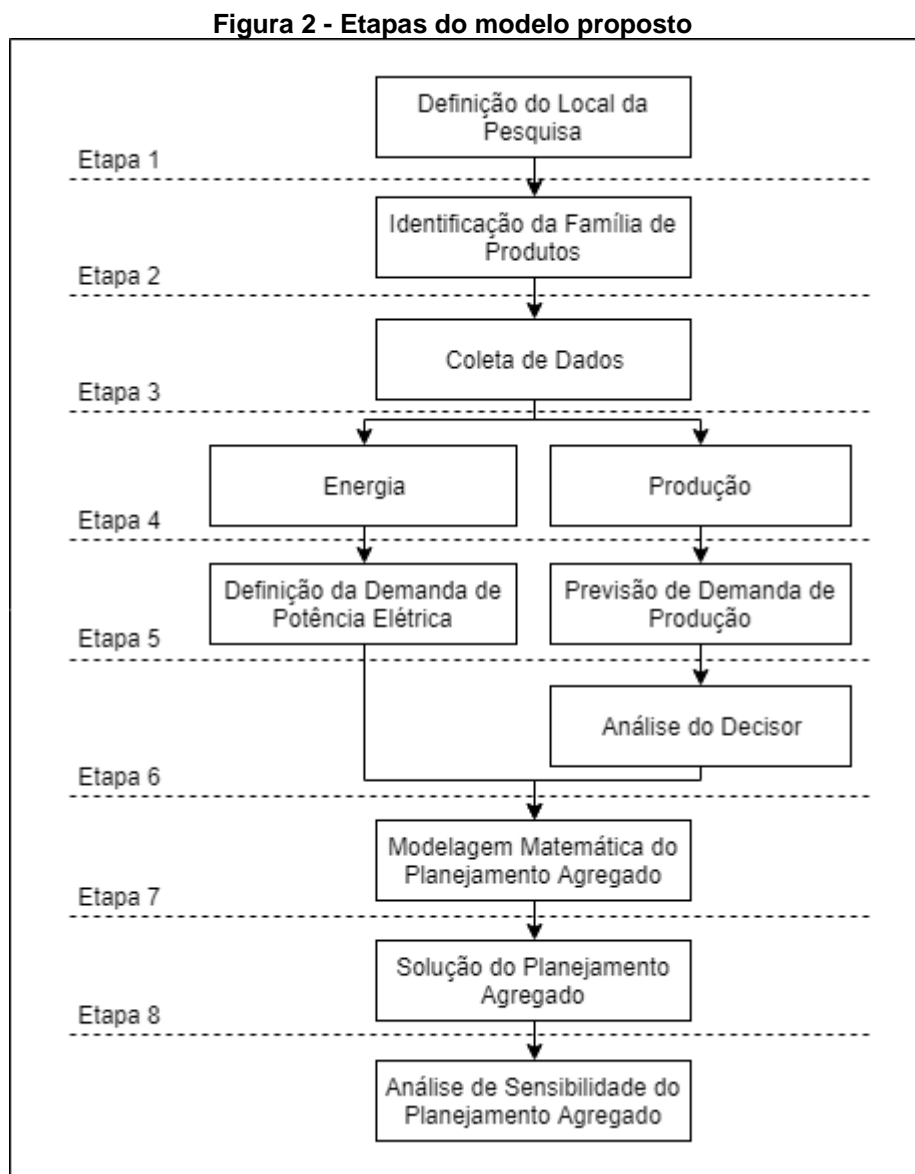
Estes estudos procuraram minimizar o consumo de energia elétrica, utilizando diferentes meios para alcançar este objetivo, como pelo uso das máquinas, peças e instalações. Nota-se que dois estudos utilizaram o PCP e planejamento agregado para resolver o problema, dois utilizaram algoritmos, sendo um com metas heurísticas e o outro com otimização em biogeografia modificada e os outros dois utilizaram uma programação matemática multiobjetivo e um programa binário.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

Com base no exposto neste capítulo, nota-se que as indústrias têm a gestão de energia como um desafio muito importante, visto que ela possui um grande potencial para reduzir o consumo de energia elétrica na produção. Cada vez mais a energia vem sendo considerada no PCP, uma vez que ele é quem determina o processo de produção. Mais especificadamente, dentro do PCP, o planejamento agregado garante os recursos básicos necessários para produzir e em quantidades suficientes antes mesmo de saber o quanto produzir de cada produto. Partindo deste ponto, a energia elétrica vai de encontro com o PAP, pois é também um recurso básico necessário para a produção. Nota-se também que, entre os parâmetros e variáveis reunidos da literatura, nenhum deles considera a demanda de potência para a minimização dos custos no PAP.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a estruturação do modelo para o planejamento agregado da produção integrando custo com consumo de energia elétrica e demanda de potência elétrica. O modelo proposto é composto por oito etapas, conforme está representado na Figura 2.



Fonte: Autoria própria

As etapas foram definidas a partir dos passos que foram seguidos para a aplicação na cooperativa participante deste estudo.

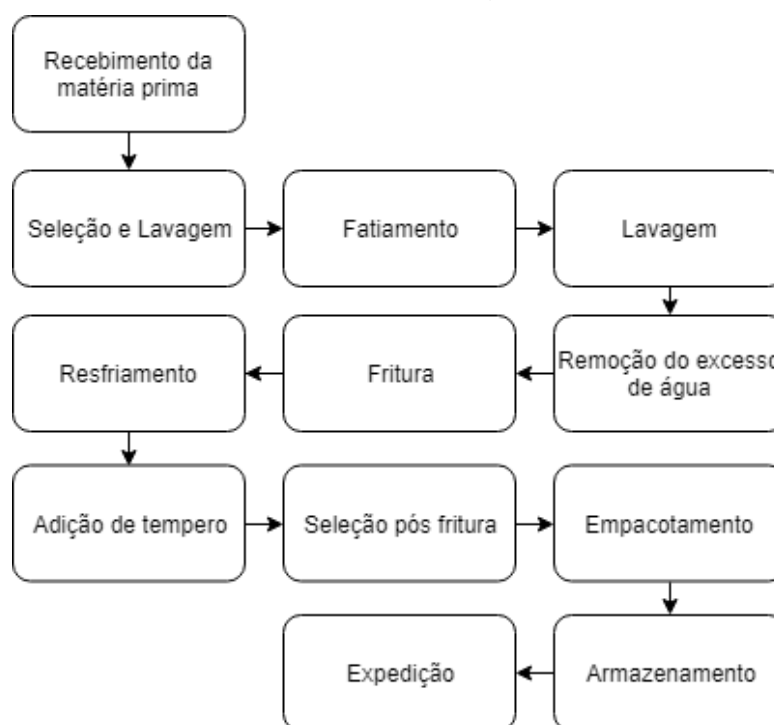
### 3.1 ETAPA 1 - DEFINIÇÃO LOCAL DA PESQUISA

O modelo foi aplicado na Castrolanda - Cooperativa Agroindustrial, em sua unidade de batata frita, localizada em Castro no Paraná, devido a abertura da cooperativa e pelo interesse no estudo proposto. A cooperativa é formada por 877 cooperados e 3.153 colaboradores, tendo 2,91 bilhões de faturamento com unidades de negócios divididas em operações (agrícola, carnes, leite, batata, feijão e administração) e industrial (carnes, leite, batata e cerveja). A unidade de batata frita conta com 36 colaboradores (17 na linha de produção de batata e o restante em administração e outros setores), produzindo em média 90 toneladas/mês de batatas fritas, em pacotes que variam de 80g a 380g.

### 3.2 ETAPA 2 - IDENTIFICAÇÃO DA FAMÍLIA DE PRODUTOS

A cooperativa produz apenas uma única família de produtos, sendo batata frita dos tipos: batata palha (tradicional, extrafina e finíssima); batata chips ondulada (tradicional, picanha, queijo e cebola e salsa) e batata chips lisa (tradicional e bacon com cheddar). O seu processo de produção está representado na Figura 3.

**Figura 3 - Processo de produção das batatas**



Fonte: Autoria própria

A matéria-prima batata chega na unidade beneficiada (limpas e descascadas). Após o recebimento, as batatas são lavadas e direcionadas por uma esteira infinita para uma seleção, em que os colaboradores cortam os defeitos apresentados. As batatas seguem pela esteira, passam pela etapa de fatiamento, por meio de um cortador, de acordo com o modelo da batata produzida (batata palha, batata chips onda e batata chips lisa). Em seguida, as batatas fatiadas são lavadas para a retirada do amido.

Na próxima etapa acontece a remoção do excesso de água e por esteiras elas seguem para a etapa de fritura em óleo por submersão. Após a fritura, as batatas são resfriadas, temperadas e novamente é efetuado uma seleção para a retirada das batatas fora do padrão estabelecido pela indústria. Por fim, as batatas prontas seguem para o empacotamento, em que são envazadas aos pacotes juntamente com nitrogênio, os pacotes são colocados em caixas de papelão e seguem para a expedição como produto acabado.

### 3.3 ETAPA 3 - COLETA DE DADOS

Em relação a energia elétrica, foram obtidos os seguintes dados: 1) tipo de contrato (modalidades azul ou verde); 2) consumo e demanda de potência dentro e fora de ponta; 3) tarifa do consumo de energia (R\$/kWh) e demanda de potência (R\$/kW) dentro e fora de ponta; 4) demanda de potência contratada e consumida.

Quanto a produção: 1) previsão de demanda de produção; 2) capacidade produtiva de produção; 4) custo de produção; 5) custo de mão de obra; 6) custo de contratação de funcionários; 7) custo de demissão de funcionários; 8) custo de energia elétrica; 9) Custo da demanda de potência; 10) quantidade de funcionários disponíveis no período; 11) Custo de hora extra.

### 3.4 ETAPA 4 - DEFINIÇÃO DA DEMANDA DE POTÊNCIA

A cobrança da tarifa de demanda de potência elétrica, de acordo com a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 (ANEEL, 2010), é calculada pela Equação (12).

$$CDP = TDPC * DPM \quad (12)$$

Onde:

$CDP$  = Custo mensal da demanda de potência (R\$)

$TDPC$  = Tarifa de demanda de potência contratada (R\$/kW)

$DPM$  = Demanda de potência medida (kW)

Quando é consumido um valor acima da demanda de potência contratada pela unidade, acontece a ultrapassagem. Desta maneira, é realizado uma cobrança diferente, obtida a partir da Equação (13) (ANEEL, 2010).

$$CUDP = (DPM - DPC) * (2 * TDPC) \quad (13)$$

Onde:

$CUDP$  = Custo com ultrapassagem de demanda de potência

$DPC$  = Demanda de potência contratada

$TDPC$  = Tarifa de demanda de potência contratada

Durante todo o período do contrato, por exemplo 1 ano, a empresa paga mensalmente pela demanda de potência previamente contratada, mesmo se não utilizar. Quando a concessionária de energia elétrica mede um valor acima da demanda de potência contratada pela unidade, acontece a ultrapassagem. A tarifa de ultrapassagem de demanda estipulada pela ANEEL é o dobro da tarifa contratada. Nessa condição a empresa paga o valor contratado acrescido do valor de ultrapassagem de demanda.

Na prática, normalmente as empresas contratam o maior valor de demanda de potência medido entre os meses do ano anterior para evitar ultrapassagem de demanda durante o próximo período de contrato. Neste trabalho é proposta uma técnica para contratar um valor de demanda de potência que minimize o custo durante o período do contrato. Inicialmente são considerados todos os valores medidos em cada mês (jan a dez) nos últimos anos.

Como a empresa deve contratar apenas um valor de demanda que será cobrado em todos os meses durante o período do contrato, a técnica proposta considera cada um dos valores observados nos últimos anos como uma possível demanda de potência a ser contratada ( $DEC_j$ ). Essa demanda é comparada com cada uma das demais demandas elétricas medidas ( $DEM_i$ ) para verificar a ultrapassagem. Sobre a demanda contratada incide uma tarifa contratada ( $TC_i$ ) e, caso a demanda



medida seja maior que a contratada, incide também uma tarifa de ultrapassagem ( $TU_i$ ). O custo durante o período do contrato é o somatório dos custos dos 'n' meses do contrato. A demanda de potência a ser contratada é aquela que resulta no menor custo do período a ser contratado ( $\min CDE_j$ ), obtida pela Equação (14).

$$CDP_j = \sum_{i=1}^n \left( (DPC_j * TDPC_i) + k * (DPM_i - DPC_j) \cdot (2 * TDPC_i) \right) \quad (14)$$

Onde,

$$k = \begin{cases} 1, & DPM_i > DPC_j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A aplicação completa neste estudo encontra-se no Apêndice D.

### 3.5 ETAPA 4 - PREVISÃO DE DEMANDA

Esta etapa consistiu em realizar a previsão de demanda de produção. Foi utilizado o modelo de Holt-Winters por possuírem muita utilização em demandas que apresentam variações, sazonalidades, tendências e por possuir suavização exponencial tripla sem precisar recalcular os fatores sazonais a partir do zero (LAWTON, 1998) (NAHAMIAS, 2009). Para o desenvolvimento dos modelos foram utilizados os *softwares R Project x64 3.2.4. e Excel*.

O primeiro passo foi dispor no excel os últimos dados de produção em apenas uma coluna e salvar o documento como 'texto (separado por tabulações)'. Em seguida, no *R Project x64 3.2.4.*, foi preciso carregar os seguintes pacotes de dados: *library(TSA); require(MASS); require(tseries); e require(forecast)*. Após a importação da tabela de dados salva no *Excel*, o conjunto de dados foi transformado em série temporal. Foi configurada a área de exibição do gráfico e plotado o gráfico de produção de batata para verificar o comportamento da série. Após, os dados seguiram duas etapas de manipulação, conforme descrito a seguir.

A primeira etapa de manipulação caracteriza-se por plotar o gráfico correlograma e realizar uma pré análise para identificar aleatoriedade e os componentes de tendência e sazonalidade. Quando a série é aleatória, são observadas autocorrelações próximas de zero. No entanto, quando se tem uma tendência ou uma sazonalidade, observa-se uma tendência de queda ou picos positivos nos valores. Caso os dados apresentem uma tendência, é preciso realizar

uma diferenciação na série com o intuito de retirar essa componente, e então repetir a pré-análise da série diferenciada. Esta repetição pode se dar até que o componente de tendência seja retirado.

Para comprovar a suposição da retirada da componente de tendência foi preciso realizar um teste de hipótese (Dickey-Fuller Aumentado) (DICKEY e FULLER, 1979). Este teste se baseia na seguinte hipótese:

H0: processo não estacionário (hipótese nula)

H1: processo estacionário (hipótese alternativa)

O p-valor do resultado do teste é comparado com um nível de significância ( $\alpha = 0,05$ ); caso este p-valor for inferior 0,05 significa que a suposição de que a série está estacionada é comprovada estatisticamente, ou seja, há indícios significantes que se pode rejeitar a hipótese nula.

Na segunda etapa, primeiramente a série foi descomposta em tendência e sazonalidade e foi exibido o gráfico para a verificação. Após este procedimento, os dados (Apêndice B) foram divididos em dois conjuntos, em que o primeiro (neste caso, composto pelos dados de 1 à 52) foi utilizado para o ajuste do modelo e o segundo (neste caso, composto pelos dados de 53 à 60) para verificar a qualidade da previsão do modelo gerado com o primeiro conjunto de dados, ou seja, os dados são utilizados para os cálculos dos erros dos modelos. Como o primeiro conjunto é utilizado para a construção do modelo, este por sua vez, precisa seguir uma série de passos. Primeiro, o conjunto sofreu um ajuste de modelo Holt-Winters que pode ser aditivo ou multiplicativo e após foi realizada uma previsão de 8 passos seguintes com estes dois modelos. Foram utilizados 8 passos seguintes, pois o segundo conjunto de dados (53 à 60) é composto por 8 dados.

Seguido da análise dos dados e geração dos modelos de previsão pelas duas vertentes, os modelos de previsão gerados devem ser analisados com o intuito de escolher o melhor entre eles, ou seja, que apresente o menor erro. Esta análise é realizada a partir do cálculo dos erros de previsão com o auxílio das equações (10), (11) e (12), e com o auxílio do *R Project*. Tendo os resultados, é escolhida a previsão realizada pelo modelo que apresente o menor erro e para os erros deste modelo, se faz necessário a realização de testes gráficos de normalidade e de autocorrelação. O

teste mais comumente usado é o teste de Shapiro-Wilk. As hipóteses simplificadoras do modelo são:

Ho: resíduos não são normais (hipótese nula)

H1: resíduos são normais (hipótese alternativa)

Se o p-valor do teste for menor do que 5%, rejeita-se a hipótese nula, indicando que os resíduos são de uma distribuição normal. Por fim, tendo o resultado do teste de normalidade, realiza-se então a previsão de demanda de produção para o período desejado. Todos os comandos e passos utilizados na previsão deste estudo estão apresentados no Apêndice A.

### 3.6 ETAPA 5 - ANÁLISE DO DECISOR

Esta etapa consiste em abrir espaço para o decisor que está inserido no processo, uma vez que ele conhece o comportamento do mercado e de seus clientes. A intenção é que o decisor opine sobre a previsão de demanda realizada, já que ela é baseada em dados passados e o futuro apresenta uma incerteza considerando as condições de mercado. A opinião do decisor se torna importante, pois a previsão de demanda afeta diretamente a próxima etapa do modelo, que é a definição da nova demanda de potência elétrica. Esta, uma vez definida, não pode ser alterada tão facilmente durante o período do contrato, assim surge o risco de se definir uma demanda de potência elétrica muito baixa ou muito alta, o que vai impactar também diretamente no custo da cooperativa.

Particularmente, neste caso, a opinião do decisor se torna importante também pela situação atual do mercado brasileiro, o qual passou por uma crise econômica em meados de 2014 (FILHO, 2017) e de acordo com os cenários expostos pelo Departamento de Pesquisa Econômica do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES) a economia tende a retomar um crescimento entre 2018-2023, mesmo dependendo da trajetória do investimento e do crescimento do PIB (BNDES, 2018).

A previsão de demanda de produção foi apresentada ao decisor da indústria cooperativa, antes de ser utilizada no planejamento agregado, onde ele determinou que os valores poderiam sofrer alterações, sendo para mais ou para menos do obtido. A partir de sua análise, a previsão foi recalculada.

### 3.7 ETAPA 6 - MODELAGEM MATEMÁTICA DO PLANEJAMENTO AGREGADO

Neste trabalho, o modelo desenvolvido para resolução do PAP, consiste em um modelo de programação linear, que por sua vez consiste no tratamento de problemas de maximização ou minimização de uma função linear que busca satisfazer um certo número de restrições.

A equação matemática foi elaborada envolvendo duas dimensões, sendo elas: trabalhista e financeira. Trabalhista, uma vez que engloba contratação e subcontratação gerando empregos. A dimensão financeira considera que o seu objetivo principal é a minimização dos custos totais da produção ao mesmo tempo que atende a demanda de produção. O custo com a demanda de potência (R\$) é obtido pelo produto da demanda de potência contratada (R\$/kW) pela tarifa de demanda de potência contratada (R\$). O custo com energia elétrica é obtido multiplicando-se o consumo de energia elétrica no mês (kWh) pela tarifa de energia elétrica (R\$/kWh) definida pela concessionária de energia.

Para elaborar o modelo de planejamento é preciso definir o horizonte do mesmo, sendo denotado nesta equação por H. Para problemas de planejamento de produção agregados, o horizonte de planejamento geralmente varia de três a quinze meses (ou seja,  $3 \leq H \leq 15$ ), assim, o H pode ser alterado de acordo com o problema a ser resolvido. Neste estudo, particularmente, o H é igual a 12 meses, uma vez que a ideia é desenvolver um plano anual de produção.

Após a definição do horizonte, é preciso definir as principais variáveis e parâmetros que descrevem o problema. É nesta etapa que o novo custo de energia elétrica reduzido e a demanda de potência, são alocados como variáveis e possuem também as suas restrições. Com o auxílio da literatura, foi possível definir os parâmetros e variáveis que serão utilizados na equação matemática do modelo proposto, que são:

Parâmetros

H = Horizonte de planejamento em períodos

t = índice dos períodos

$D_t$  = Demanda prevista para o período t

$C_t^u$  = Custo unitário de produção no período t

$C_t^{ee}$  = Custo unitário de energia elétrica no período t

$C_t^{de}$  = Custo de demanda de potência no período t

$C_t^e$  = Custo de estoque de uma unidade no período t

$C_t^m$  = Custo unitário de mão de obra no período t

$C_t^c$  = Custo de contratação de um funcionário no período t

$C_t^D$  = Custo de demissão de um funcionário no período t

$C_t^S$  = Custo de Subcontratação no período t

$C_t^f$  = Custo de falta de estoque no período t

$C_t^{He}$  = Custo de hora extra no período t

Variáveis de decisão

$U_t$  = Número de unidades produzidas no período t

$U_t^S$  = Número de unidades produzidas em subcontratação no período t

$U_t^e$  = Número de unidades em estoque no final do período t

$U_t^f$  = Número de unidades em falta no período

$T_t$  = Número de trabalhadores disponíveis no período t

$T_t^c$  = Número de trabalhadores contratados no período t

$T_t^D$  = Número de trabalhadores demitidos no período t

$Ca_t$  = Capacidade produtiva de produção no período t

$D_t^e$  = Demanda de potência contratada no período t

$E_f$  = Estoque no final do período

$H_t^n$  = Número de horas normais trabalhadas no período t

$H_t^e$  = Número de horas extras trabalhadas no período t

Para obter o custo com energia elétrica considera-se a tarifa de energia elétrica ( $TE$ ) em R\$/kWh e um indicador ( $I$ ) de performance de energia (BAKAR et al., 2015) que mede a relação entre o consumo de energia elétrica pela quantidade produzida (kWh/kg). Esse indicador é o valor médio dos indicadores mensais nos últimos 5 anos. Assim o custo com energia elétrica (R\$) é obtido por:  $C_t^{ee} = I \cdot TE$ .

Como o foco deste trabalho é integrar essa demanda de potência para a redução dos custos, o custo de demanda de potência no período foi considerado um parâmetro e a demanda de potência contratada no período considerada como uma

variável de decisão. Desta maneira, a partir da definição dos parâmetros e variáveis é possível construir a função de minimização de custos (Equação 15):

$$\text{Min}_{\sum_{t=1}^T} (C_t^u \cdot U_t + C_t^{ee} \cdot U_t + C_t^e \cdot U_t^e + C_t^m \cdot T_t + C_t^c \cdot T_t^c + C_t^D \cdot T_t^D + C_t^{He} \cdot H_t^e + C_t^S \cdot U_t^S + C_t^f \cdot U_t^f + C_t^{de} \cdot D_t^e) \quad (15)$$

Esta função possui as seguintes restrições: 1) conservação de força de trabalho; 2) limitação da produção no período; 3) limites de horas extras; 4) limite de estoque; 5) limites de pedidos em atraso; 6) limitação de energia elétrica e 7) restrições de não negatividade.

Na primeira restrição (Equação 16) o número de trabalhadores no período atual deve ser igual ao número de trabalhadores no período anterior somado às contratações no período atual e subtraído das demissões no período atual, sendo:

$$T_t = T_{t-1} + T_t^c - T_t^D \quad \text{para } 1 \leq t \leq H \quad (16)$$

A segunda restrição (Equação 17) caracteriza-se pela limitação da produção no período  $t$ , em que a capacidade produzida não pode ultrapassar a capacidade disponível. A capacidade disponível internamente é definida com base nas horas de mão de obra disponíveis, normais ou extras). Assim, ela é determinada pela quantidade que a empresa pode produzir em horas normais por mês ( $U_t^N$ ) e em hora extra ( $U_t^H$ ), sendo:

$$Ca_t = x \cdot H_t^N + H_t^H \quad \text{para } 1 \leq t \leq H \quad (17)$$

Na terceira restrição (Equação 18) existe um limite para horas extras (estabelecido pela própria indústria), ou seja, se não é desejado que a produção em horas extras ultrapasse 25% da capacidade produtiva em cada período, a restrição se apresenta sendo:

$$H_t \leq 0,25 \quad \text{para } 1 \leq t \leq H \quad (18)$$

Na restrição de estoque é realizado o equilíbrio do estoque ao final de cada período. A demanda líquida para o período  $t$  é obtida a partir da soma da demanda  $D_t$  e o número de unidades em falta  $U_{f-1}$  do período anterior. Assim esta demanda pode ser atendida pela produção atual (em regime normal  $U_t$ , subcontratação  $U_t^S$ , hora extra

$U_t^H$  e pelo estoque anterior  $E_{f-1}$ ) ou parte dela é acumulada. Esta relação está representada pela Equação (19):

$$U_t^e = E_i + H_t^n + U_t^{He} + U_t^S - D_t - U_{f-1}, \text{ para } 1 \leq t \leq H \quad (19)$$

A restrição de pedidos em atraso (Equação 20) está limitada ao número de produtos, permitido pela indústria, que ficarão em falta, sendo:

$$U_t^f \leq X \text{ para } 1 \leq t \leq T \quad (20)$$

A restrição de limitação de energia (Equação 21) está limitada a potência de demanda de potência contratada.

$$D_t^{pe} = X, \text{ para } 1 \leq t \leq H \quad (21)$$

As restrições de não negatividade as variáveis de decisão devem ser não negativas. Esta restrição indica que o número de unidades produzidas, de unidades em estoque final, de trabalhadores disponíveis, trabalhadores contratados e demitidos, devem ser maiores ou iguais a zero, de acordo com a Equação (22).

$$U_t; U_t^e; T_t; T_t^c; T_t^D; U_t^S; U_t^f; H_t \geq 0 \text{ para } 1 \leq t \leq H \quad (22)$$

Foram considerados, todos os parâmetros e variáveis que envolvem o processo de produção. Porém, na aplicação, eles podem ser retirados da equação ou simplesmente utilizar o zero, dependendo das características da empresa. O modelo resultante envolve determinar os meios mais eficazes de satisfazer a demanda agregada prevista, ajustando as taxas de produção, a quantidade de energia elétrica e as outras variáveis controláveis.

O horizonte de planejamento interfere no tempo em que planejamento será utilizado. A demanda prevista influencia em todos os custos envolvidos no processo, pois a partir dela que será possível prever a quantidade que deve ser produzida no período. O número de unidades em estoque se relaciona com o custo de estoque e com as unidades produzidas, que por sua vez determina todos os custos e a quantidade de trabalhadores necessários. Esta quantidade de trabalhadores, por sua vez, influência na quantidade que deve ser contratada e demitida, que ao ser definida, determina os custos de contratação e demissão.

O número de unidades produzidas em regime normal está relacionado com o custo destas unidades e com a mão de obra deste período, assim como as unidades produzidas em hora extra determina o custo final em produção de hora extra e o custo com mão de obra em hora extra. Da mesma maneira se relaciona o número de unidades produzidas em subcontratação com o custo da produção em subcontratação. A capacidade produtiva se relaciona com o número de unidades produzidas, uma vez que ela não pode exceder essa capacidade. Esta capacidade, por sua vez, determina a produção máxima. A produção determina o custo de energia elétrica final.

### 3.8 ETAPA 7 - SOLUÇÃO DO PLANEJAMENTO AGREGADO

Nesta etapa, a equação matemática foi resolvida com o auxílio da ferramenta do Solver do *software Excel* e conseqüentemente foi possível elaborar o plano de produção para os próximos 12 meses. Após este procedimento, foi comparado o cenário atual da cooperativa com o cenário proposto utilizando a nova demanda de potência. A solução exposta no *Excel* encontra-se no Apêndice E.

### 3.9 ETAPA 8 - VERIFICAÇÃO DO MODELO (ANÁLISE DE SENSIBILIDADE)

A análise de sensibilidade consiste em verificar a estabilidade da solução a partir de possíveis variações dos parâmetros utilizados na programação linear, ou seja, ela determina como a solução pode ser modificada a partir de alterações em seus parâmetros (MALCZEWSKI, 1999). Para Butler et al. (1997), ela é quem determina a robustez das soluções obtidas.

Nesta análise é verificado alguns pontos. Bazaraa, Jarvis e Sherali (2005) relata que o preço sombra é associado com as restrições da PL, se aumentar, a função objetivo também se modifica na mesma proporção. O custo reduzido das variáveis mede o impacto na função objetivo provocado pela entrada de 1 unidade da variável na solução, assim quando uma variável apresenta valores positivos, indica que ela não participa da solução ótima e que há penalidade a ser paga caso ela seja utilizada. A análise de sensibilidade foi realizada pela ferramenta do Solver do *Software Excel*.



## 4 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MODELO

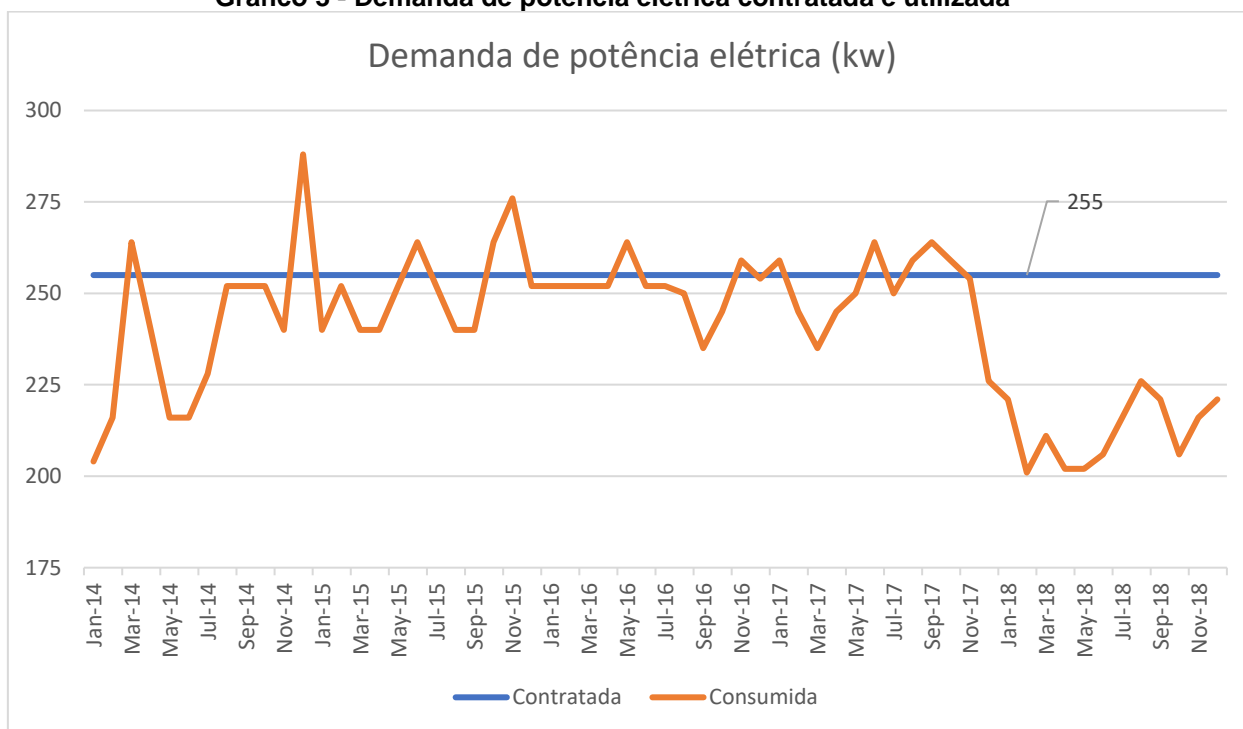
### 4.1 DADOS COLETADOS

A unidade não possui geração própria de energia, sendo a mesma adquirida por uma Cooperativa de Eletrificação Rural - Eletrorural, a qual faz a aquisição da Companhia Paranaense de Energia - COPEL e repassa para a unidade. Assim, quem define a tarifa é a quem realiza o repasse, ou seja, a Eletrorural. O contrato de energia pertence ao grupo A4 horosazonal verde, tendo o tipo de contrato verde. Essa modalidade tarifária indica que a unidade consumidora pode utilizar a demanda de potência contratada independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta), com valor único de tarifa.

A unidade produz 8 horas/dia operando das 07:40 às 16 horas, aos sábados acontece 8 horas de higienização de equipamentos e instalações e aos domingos e feriados são trabalhados apenas em casos pontuais. A produção não ocorre em horário de ponta que acontece, no inverno das 18:00 às 21:00 e no verão das 19:00 às 22:00, pois o custo da energia dentro no horário de ponta é maior que o fora de ponta (R\$ 0,30 /kWh fora de ponta e R\$ 1,03 /kWh na ponta).

A demanda de potência contratada pela indústria no último período de contrato foi 255kW. Se por acaso for consumido mais do que 5% da demanda contratada, a unidade consumidora precisa pagar o dobro do valor da demanda de potência contratada. Diante disto, a tarifa de demanda de potência contratada possui o valor de R\$13,14/kW, e a tarifa de ultrapassagem o valor de R\$26,28/kW.

A partir do histórico do consumo de potência elétrica dos últimos 5 anos, disponíveis no Apêndice A, foi possível plotar um gráfico para analisar o comportamento deste consumo, conforme mostra o Gráfico 3.

**Gráfico 3 - Demanda de potência elétrica contratada e utilizada**

**Fonte: Autoria própria**

A partir do gráfico é possível perceber que, ao longo dos últimos 5 anos, a unidade consumidora excedeu a demanda de potência contratada em alguns meses e, na maioria dos meses, não utilizou o valor contratado, de 255 kW. Nos anos de 2014 e 2016, nota-se uma ultrapassagem no consumo em apenas dois meses, enquanto em todos os meses ocorreram a perda da demanda de potência contratada. Já em 2015, ocorreram 3 ultrapassagens. Em 2017 foi o ano em que mais ocorreu a ultrapassagem, totalizando em 5 meses. Em contrapartida, durante o ano de 2018, a unidade consumidora pagou por uma demanda muito superior que a demanda de potência utilizada. Isso evidencia uma falta de conciliação entre o planejamento da produção e o planejamento energético.

Embora ao longo desses anos analisados, ocorreram 9 ultrapassagens na demanda contratada, somente duas geraram multa, em razão das demais estarem dentro dos 5% permitido pela cooperativa fornecedora. Assim, é possível afirmar que a unidade está perdendo bastante demanda contratada, e conseqüentemente tendo um custo que poderia ser evitado. Por esta razão, na etapa 6 apresentada no tópico 4.6, busca-se definir uma nova demanda de potência a ser contratada, de maneira que a mesma minimize os custos totais.

Quanto a produção, para realizar o planejamento agregado foi necessário coletar as seguintes dados: 1) capacidade produtiva de produção; 2) custo de produção; 3) custo de mão de obra; 4) custo de contratação de funcionários; 5) custo de demissão de funcionários; 6) custo de energia elétrica; 7) quantidade de funcionários disponíveis no período; e 8) Custo de hora extra.

O ambiente produtivo da cooperativa se caracteriza como produção sob encomenda, pois trabalham com uma demanda puxada, produzindo por lote. Porém, a indústria realiza um planejamento trimestral de acordo com os dados de pedidos anteriores, mas espera a confirmação dos pedidos por parte dos clientes para realmente produzir o que for confirmado. Isto ocorre mesmo que a quantidade seja maior ou menor que o planejado. Isto ocorre porque a indústria não trabalha com estoque, considerando que se trata de um produto perecível e a validade é curta.

Quanto ao quadro de colaboradores, a cooperativa não trabalha com demissão e contratação, visto que preferem reduzir ou aumentar os turnos caso aconteça alguma alteração na demanda. Da mesma maneira, não optam pela subcontratação.

A produção somente ocorre com os pedidos confirmados e o que é programado acaba não sendo cumprido. Neste caso, se o número programado for maior que o número de pedidos confirmados, acaba interferindo na demanda de potência contratada, correndo o risco de ser paga e não utilizada.

## 4.2 DEFINIÇÃO NOVA DEMANDA DE POTÊNCIA

A partir dos dados coletados, demonstrados no tópico 4.1 foram organizados em uma tabela todas as demandas de potência medidas nos últimos 5 anos (Apêndice A). A partir disto, e com o auxílio da Equação 17 foi possível obter os custos totais de cada valor e conseqüentemente definir o melhor entre eles, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Custos demanda de potência

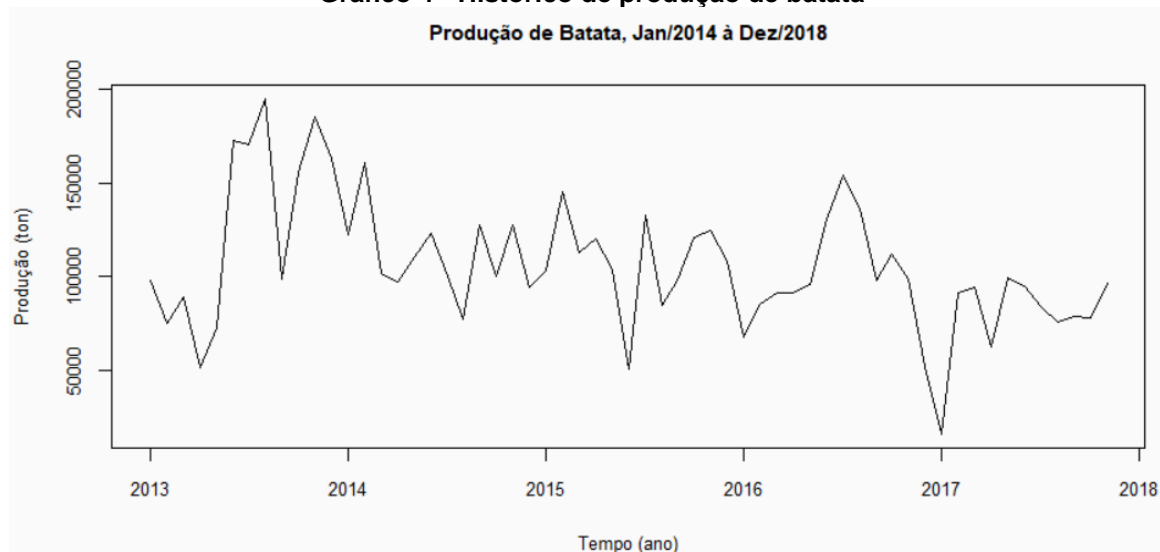
<b>Demanda de Potência Elétrica (w)</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>
288	75686,4
276	72848,16
264	70325,28
259	69405,48
255	68774,76
254	68643,36
252	68433,12
250	68275,44
245	68012,64
240	67881,24
235	67881,24
228	68065,2
226	68170,32
221	68564,52
216	69090,12
211	69747,12
206	70482,96
204	70903,44
202	71323,92
201	71560,44

Fonte: Autoria própria

Nota-se que as demandas 240W e 235W apresentaram o mesmo valor de R\$67881,24. Desse modo, a demanda de potência a ser contratada pela cooperativa é de 235W. Os cálculos encontram-se no Apêndice D.

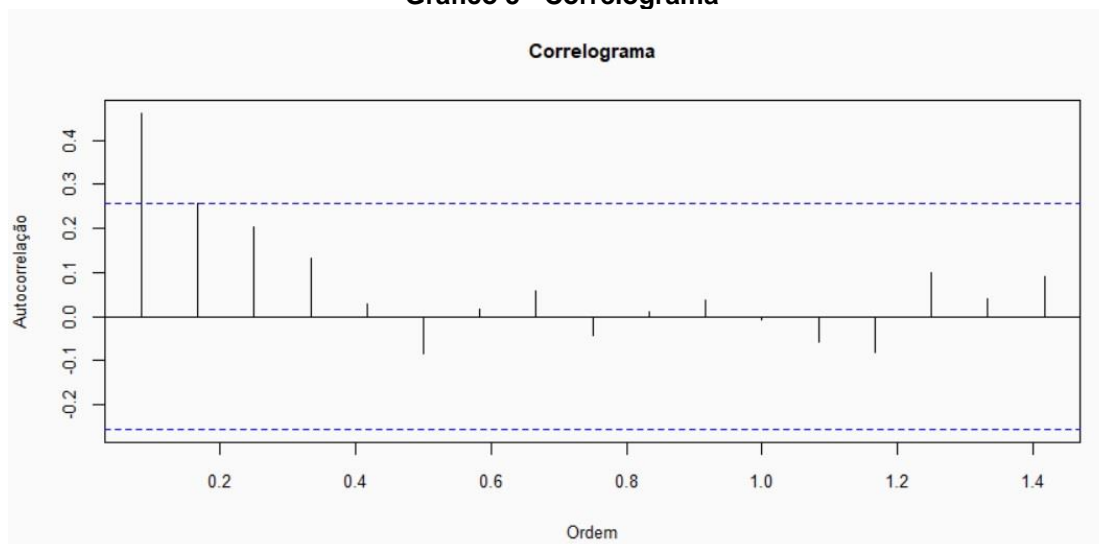
#### 4.3 PREVISÃO DE DEMANDA DE PRODUÇÃO

Para elaboração da previsão demanda de produção, foram considerados os dados históricos de produção de kg de batata no período de 60 meses, de janeiro de 2014 a dezembro de 2018, encontrados no Apêndice A. O primeiro passo foi realizar a análise do perfil dos dados levantados a fim de identificar os componentes presentes, conforme o gráfico 4. Nesse gráfico é possível notar que a produção de batatas é uma série que apresenta uma leve tendência decrescente com picos altos e baixos. Assim como não apresenta um padrão bem definido de sazonalidade e cíclica.

**Gráfico 4 - Histórico de produção de batata**

Fonte: Autoria própria

Foi plotado um gráfico de correlograma para entender se a série era aleatória ou se possuía alguma tendência ou sazonalidade, conforme observado no Gráfico 5. Quando a série é aleatória, ela apresenta autocorrelações próximas de zero. No entanto, quando há uma tendência ou uma sazonalidade, a série apresenta uma tendência de queda ou picos positivos nos valores.

**Gráfico 5 - Correlograma**

Fonte: Autoria própria

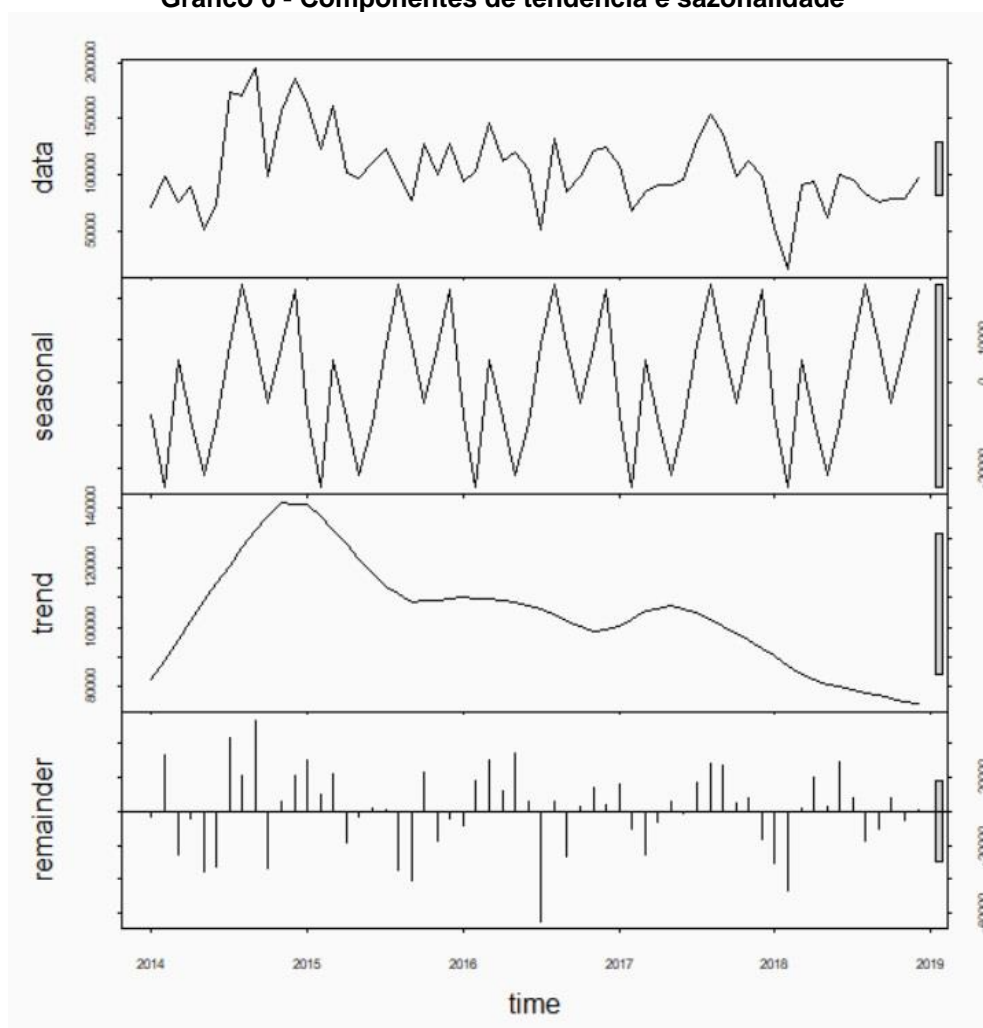
No gráfico 5, o eixo vertical indica a autocorrelação e o horizontal a defasagem. A linha tracejada azul indica onde é significativamente diferente de zero. Nota-se que todos os valores, exceto um, estão dentro do limite da linha tracejada azul. Isso significa autocorrelação igual a zero, indicando que a produção de batatas pode ser

aleatória e supostamente estacionária. Entretanto, para ter a certeza das afirmações foi necessário realizar um teste para comprovar as suposições.

O teste *Dickey-Fuller* Aumentado (ADF) resultou em  $-3.5467$ ,  $Lag\ order=3$  e  $p\text{-value}=0.0453$ , confirmando a hipótese alternativa, ou seja, o processo é estacionário. Neste caso, a produção de batatas pode ser aleatória e estacionária.

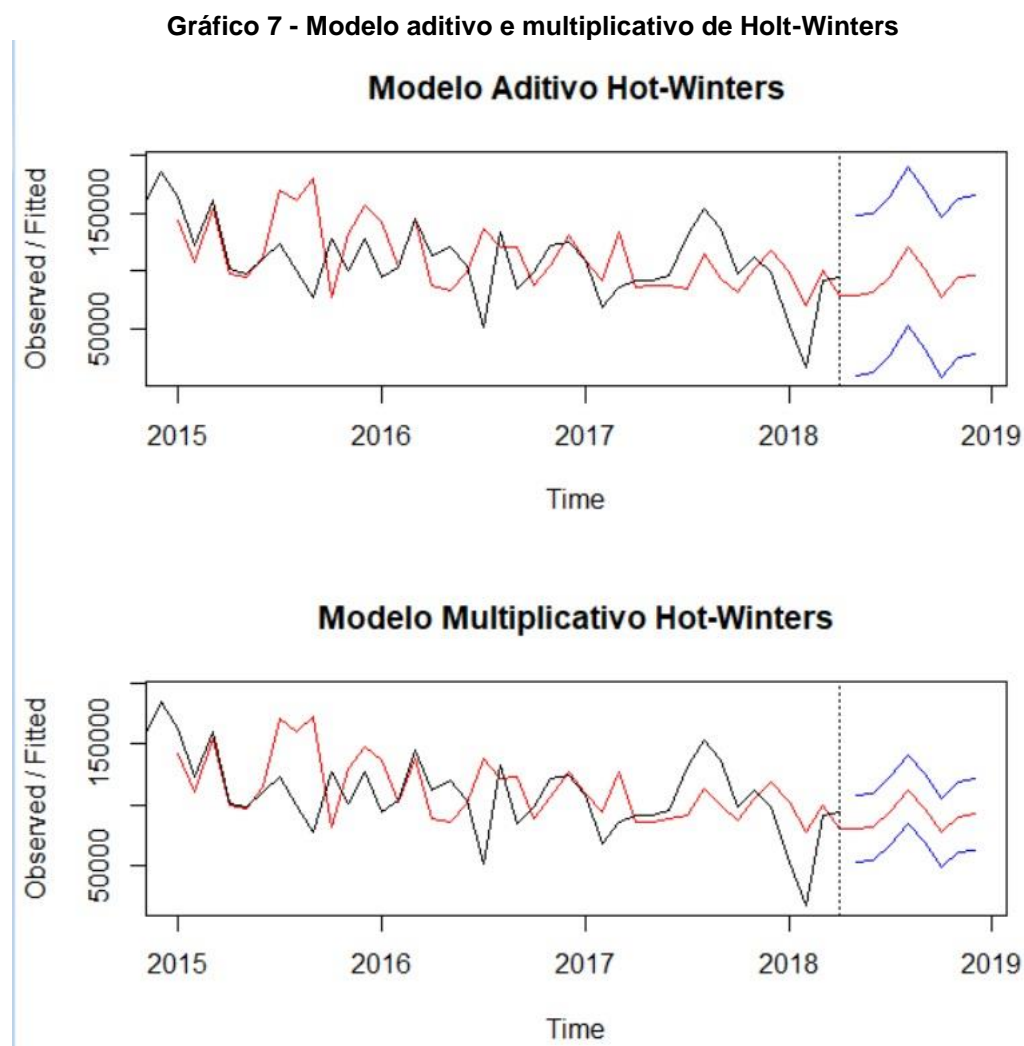
A partir do teste ADF, foi realizada a decomposição da série em tendência e sazonalidade, conforme ilustra o Gráfico 6. O desempenho das componentes e o comportamento delas após a diferenciação da demanda real mostra que existe sazonalidade na produção de batatas sempre no mesmo período no decorrer dos 5 anos. Quanto à tendência, é possível observar que houve um leve crescimento no ano de 2014 e a partir de 2015 começou a decrescer. Isto pode ser justificado devido à crise que se iniciou em meados de 2014, com a queda do Produto Interno Bruto (PIB) per capita brasileiro (FILHO, 2017), que afetou diretamente as vendas da cooperativa.

**Gráfico 6 - Componentes de tendência e sazonalidade**



Fonte: Autoria própria

A série foi dividida em dois conjuntos de dados, sendo o primeiro composto pelos dados de 1 à 52 e o segundo de 53 à 60 (Apêndice B - Tabela B), para verificar a qualidade e para plotar o perfil dos modelos aditivo e multiplicativo, mostrados no Gráfico 7.



**Fonte: Autoria própria**

Nota-se, a partir dos gráficos, que o comportamento do perfil dos dois modelos se aproxima bastante do perfil dos dados originais, ou seja, os modelos apresentam um comportamento semelhante a produção de batatas nos últimos 5 anos. Entretanto, esta análise visual não é suficiente para definir o melhor modelo para representar a previsão de demanda. Por esta razão foram calculados os erros de previsão de cada modelo, para então escolher o que apresentasse o menor entre eles, pois, quanto menor o erro, melhor é o desempenho do método utilizado. Os resultados dos cálculos estão expostos na Tabela 4.

**Tabela 4 - Medidas de desempenho dos modelos**

<b>Modelos</b>	<b>REQM</b>	<b>MAE</b>	<b>MAPE</b>
Aditivo	18928,18	14549,97	62,30
Multiplicativo	15047,58	13076,68	28,61

Fonte: Autoria própria

A partir da Tabela 3 é possível verificar que o modelo multiplicativo é o modelo que possui o menor erro, ou seja, seu desempenho é melhor para realizar a previsão de demanda de produção. Diante disso, os erros do modelo multiplicativo foram testados estatisticamente a fim de identificar as normalidades. O teste de normalidade de *Shapiro-Wilk* resultou em  $W=0.92923$  e  $p\text{-value}=0.0152$ , rejeitando assim a hipótese nula. Isso indica que o modelo multiplicativo apresenta normalidade.

Após encontrar o melhor modelo para realizar a previsão, foi realizada a previsão de demanda de produção para os próximos 12 meses, conforme mostra a Tabela 5.

**Tabela 5 - Previsão de demanda de produção**

<b>Mês</b>	<b>Previsão de demanda de produção (kg)</b>
Janeiro	69.579,07
Fevereiro	45.862,29
Março	84.995,27
Abril	74.710,46
Maio	69.592,76
Junho	71.464,08
Julho	82.127,11
Agosto	97.713,42
Setembro	84.283,04
Outubro	66.475,00
Novembro	77.758,62
Dezembro	79.578,84

Fonte: Autoria própria

#### 4.4 ANÁLISE DO DECISOR

A previsão de demanda de produção foi apresentada ao decisor da indústria cooperativa, antes de ser utilizada no planejamento agregado, onde ele determinou que os valores poderiam sofrer alterações, sendo de 20%, 10% e 5% a menos até 20%, 10% e 5% a mais de produção. Cada uma destas porcentagens foi representada por uma variável linguística, conforme mostra a Tabela 6.



**Tabela 6 - Variáveis linguísticas**

<b>Pontos</b>	<b>Variáveis linguísticas</b>	<b>% em relação a demanda</b>
1	muito decréscimo na demanda (MD)	-20%
2	decréscimo na demanda (DD)	-10%
3	leve decréscimo na demanda (LD)	-5%
4	sem variação na demanda (SV)	0%
5	Leve aumento na demanda (LA)	5%
6	aumento na demanda (AD)	10%
7	muito aumento na demanda (MA)	20%

**Fonte: Autoria própria**

A partir da Tabela 5, o decisor, utilizando sua experiência e o conhecimento do mercado, analisou o resultado da previsão de demanda mais uma vez e opinou sobre cada um dos valores de demanda de produção dos 12 meses. As respostas estão apresentadas na Tabela 7.

**Tabela 7 - Respostas do decisor**

<b>Mês</b>	<b>Previsão de demanda de produção (kg)</b>	<b>Pontos</b>
Janeiro	69.579,07	5
Fevereiro	45.862,29	5
Março	84.995,27	3
Abril	74.710,46	3
Maio	69.592,76	5
Junho	71.464,08	5
Julho	82.127,11	3
Agosto	97.713,42	3
Setembro	84.283,04	3
Outubro	66.475,00	5
Novembro	77.758,62	5
Dezembro	79.578,84	5

**Fonte: Autoria própria**

O decisor optou apenas por duas situações, sendo um leve aumento na demanda ou leve decréscimo na demanda. Isto foi justificado pois, segundo ele, os meses em que ele acredita ter um leve aumento na demanda, foram os meses que mais foram afetados pela situação econômica do país, nos anos anteriores. Como o mercado voltou a crescer, ele acredita que este leve crescimento se concretizará. Quanto aos meses em que ele acredita ter um leve decréscimo, são os meses que geralmente a produção é um pouco menor, devido aos pedidos dos clientes que acontecem de forma sazonal. Após esta análise as previsões foram recalculadas e foi possível obter uma nova previsão de demanda de produção para os próximos 12 meses, exposta na Tabela 8.

**Tabela 8 - Nova previsão de demanda de produção**

<b>Mês</b>	<b>Previsão de demanda de produção (kg)</b>
Janeiro	73.058,02
Fevereiro	48.155,40
Março	80.745,51
Abril	70.974,94
Mai	73.072,40
Junho	75.037,28
Julho	78.020,75
Agosto	92.827,75
Setembro	80.068,89
Outubro	69.798,75
Novembro	81.646,55
Dezembro	83.557,78

**Fonte: Autoria própria**

Outros detalhes em relação a esta aplicação encontram-se no Apêndice B.

#### 4.5 MODELAGEM E SOLUÇÃO DO PLANEJAMENTO AGREGADO NA COOPERATIVA

A estratégia utilizada para desenvolver o planejamento agregado foi a de acompanhamento da demanda, com mão-de-obra constante e com o uso de horas extras, pois, esta estratégia fornece continuidade da mão-de-obra e evita tantos os custos emocionais como os tangíveis, de contratar e despedir pessoal.

Os dados utilizados para a estratégia escolhida, conforme mostra a Tabela 9, foram levantados com a cooperativa em estudo e calculados.

**Tabela 9 - Custos da Cooperativa**

<b>Custos</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Unitário de produção	15,00 / Kg
Mão de obra	2153,25 / mês
Hora Normal	13,45 / hora
Hora Extra	23,53 / hora
Contratação	2.100,00 / trabalhador
Demissão	18.120,48 / trabalhador
Tarifa de energia elétrica	0,30 / R\$/kWh
Demanda de potência	13,14 / Watts

**Fonte: Cooperativa em estudo (2019)**

O custo unitário de produção é calculado pela empresa englobando todos os custos envolvidos no processo. Quanto ao custo de mão de obra, em horário normal os trabalhadores recebem um salário normal de R\$1485,00, porém o valor real que a empresa tem com este custo é R\$2153,25 (R\$13,45 x 8 horas/dia x 20 dias/mês),

devido aos encargos (R\$668,25) pagos todo mês. Quanto ao custo da hora extra, é acrescido 75% do custo da hora normal.

Quanto aos custos de contratação e demissão, o alto valor de ambos justifica o porquê de a cooperativa não utilizar a estratégia de contratar e demitir. O custo da contratação é composto pelo custo de recrutamento, custos médicos (médico e enfermeira), custo de cadastro e custo de integração e treinamento na área contratada. Já a demissão envolve ainda mais custos, sendo 40% de multa sobre o FGTS (R\$640,00), rescisão (R\$475,00), aviso prévio (R\$1485,00), férias (R\$1485,00), 1/3 de férias (R\$495,00), 13º salário (R\$1485,00), o salário (R\$1485,00) e os encargos (R\$10.570,28). Vale ressaltar que esses valores são variáveis, dependendo do tempo de trabalho do colaborador, que neste caso é de no mínimo 1 ano de trabalho na cooperativa.

Para obter o custo com energia elétrica foi multiplicado o valor de tarifa de energia elétrica ( $TE=0,30$  R\$/kWh) a partir do contrato com a concessionária (Tabela 9) pelo valor do índice de performance de energia ( $I$ ), obtido pela média dos últimos 5 anos. Uma análise de correlação do consumo de energia elétrica em função da produção apresentou um coeficiente de determinação  $R^2=0,64$ . Foram então excluídos alguns valores de meses atípicos (principalmente em decorrência da crise econômica no país a partir de 2014) por serem valores extremos ou mais distantes da reta (*outliers*), e obteve-se  $R^2=0,77$ . Desse modo, o valor médio do indicador de performance de energia foi  $I=0,80$  kWh/kg, com Desvio Padrão= $0,126$  e Erro= $\pm 0,017$ . Assim, o custo unitário de energia elétrica foi de  $C_t^{ee} = 0,24$  R\$/kg.

O custo de produção, de energia elétrica e demanda de potência elétrica são proporcionais ao volume de produção. Em cada período a demanda precisa ser satisfeita, pois os pedidos são feitos por encomenda, podendo utilizar a hora extra para cumprir o plano. Os recursos físicos da firma são considerados fixos durante o horizonte de planejamento, em que o mesmo foi considerado por 12 meses. O custo total verificado durante o horizonte de planejamento é a soma de todos os custos mencionados, dado pela Equação 25.

$$\text{Min}_{\sum_{t=1}^T} (C_t^u \cdot U_t + C_t^{ee} \cdot U_t + C_t^m \cdot T_t + C_t^c \cdot T_t^c + C_t^D \cdot T_t^D + C_t^{de} \cdot D_t^{pe} + C_t^{He} \cdot H_t^e) \quad (25)$$

Ou seja,

$$\text{Min}_{\sum_{t=1}^{12}} (18,37. U_t + 0,24.U_t + 2.153.T_t + 2.100 .T_t^C + 18.120,48.T_t^D + 3,14.D_t^{pe} + 23,53. H_t^e) \quad (26)$$

O objetivo do estudo é encontrar um plano agregado que minimize o custo total incorrido durante o horizonte de planejamento. Para isso, os valores são sujeitos a uma série de restrições, em que estas estão vinculadas as variáveis de decisão.

- **Restrição de força de trabalho, contratação e demissão:** Considerando que a cooperativa não realiza a estratégia de contratação e demissão, o número de trabalhadores no período atual sempre será o mesmo, sendo:

$$T_t = 17, \text{ para } t = 1, \dots, 12 \quad (27)$$

**Restrições de capacidade:** A capacidade é determinada pela quantidade que a empresa pode produzir em horas normais por mês e em hora extra. Segundo informações fornecidas pela cooperativa, a capacidade de produção é de 88.000 kg por mês, sendo possível produzir 550 kg/hora, ou seja, 88.000 kg/mês em hora normal (8 horas/dia). Quanto a hora extra, ela é realizada com todos trabalhadores da linha, pois, a cooperativa trabalha com o mínimo de trabalhadores necessários para atender a demanda. Como é permitido somente 2 horas extras por dia temos:

$$U_t \leq 5.176,47.H_t^n + \frac{1100.H_t^e}{2}, \text{ para } t=1, \dots, 12 \quad (28)$$

- **Limite de horas extras:** Esta restrição limita a quantidade de horas extras em 40 horas mensais cada trabalhador.

$$H_t \leq 40 T_t \quad \text{para } t = 1, \dots, 12 \quad (29)$$

- **Restrições de demanda de potência:** Como foi encontrado o valor de demanda de potência que minimiza os custos totais, então o mesmo deve ser mantido para todos os períodos do planejamento, desta forma:

$$D_t^{pe} = 235, \text{ para } t = 1, \dots, 12 \quad (30)$$

- **Restrições de não negatividade:** As variáveis de decisão devem ser não negativas, sendo:

$$U_t + T_t + T_t^c + T_t^D + D_t^{pe} + H_t^e \geq 0, \text{ para } t = 1, \dots, 12 \quad (31)$$

Com a ferramenta utilizada na pesquisa, foi possível elaborar o plano de produção para os próximos 12 meses e posteriormente comparar o cenário atual com o proposto, considerando a nova demanda de potência.

#### 4.5.1 Cenário Atual

O cenário atual da empresa é manter a mão de obra constante, utilizando de horas extras quando necessário e a contratação de 255 watts de demanda de potência. Verifica-se a partir da Tabela 10 que a demanda de produção (máximo 88.000 kg/mês) é atendida, exceto no 8º período que será necessário realizar 9 horas extras para conseguir atender a demanda de produção.

**Tabela 10 - Plano agregado do cenário atual**

Período	Contratados	Demitidos	Força de trabalho	Produção em Horas extras	Produção	Demanda de potência	Demanda de Produção
0	0	0	17	0	0	255	0
1	0	0	17	0	73058,02	255	73.058,02
2	0	0	17	0	48155,40	255	48.155,40
3	0	0	17	0	80745,51	255	80.745,51
4	0	0	17	0	70974,94	255	70.974,94
5	0	0	17	0	73072,40	255	73.072,40
6	0	0	17	0	75037,28	255	75.037,28
7	0	0	17	0	78020,75	255	78.020,75
8	0	0	17	9	92827,75	255	92.827,75
9	0	0	17	0	80068,89	255	80.068,89
10	0	0	17	0	69798,75	255	69.798,75
11	0	0	17	0	81646,55	255	81.646,55
12	0	0	17	0	83557,78	255	83.557,78
<b>Custo Total</b>	<b>14.301.554, 61</b>						

Fonte: Solver Excel

#### 4.5.2 Cenário Proposto com a nova demanda de potência

Mantendo a estratégia utilizada pela empresa, de mão de obra constante. Foi possível definir um novo plano com a nova demanda de potência elétrica definida, conforme Tabela 11.

**Tabela 11 - Plano agregado com a nova demanda de potência**

Período	Contratados	Demitidos	Força de trabalho	Produção em Horas extras	Produção	Demanda de potência	Demanda de Produção
0	0	0	17	0	0	235	0
1	0	0	17	0	73058,02	235	73.058,02
2	0	0	17	0	48155,40	235	48.155,40
3	0	0	17	0	80745,51	235	80.745,51
4	0	0	17	0	70974,94	235	70.974,94
5	0	0	17	0	73072,40	235	73.072,40
6	0	0	17	0	75037,28	235	75.037,28
7	0	0	17	0	78020,75	235	78.020,75
8	0	0	17	9	92827,75	235	92.827,75
9	0	0	17	0	80068,89	235	80.068,89
10	0	0	17	0	69798,75	235	69.798,75
11	0	0	17	0	81646,55	235	81.646,55
12	0	0	17	0	83557,78	235	83.557,78
<b>Custo Total</b>	<b>14.298.401,01</b>						

Fonte: *Solver Excel*

Verifica-se que, mantendo a estratégia, o que difere este plano do anterior é o custo reduzido em R\$3153,60 reais em razão da nova demanda de potência que deve ser contratada por este ano. Mesmo com esta redução foi elaborado outro plano, buscando a minimização dos custos totais, caso a empresa permitisse a contratação e demissão de funcionários, se necessário. O resultado é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Plano agregado cenário proposto

Período	Contratados	Demitidos	Força de trabalho	Produção em Horas extras	Produção	Demanda de potência	Demanda de Produção
0	0	0	17	0	0	235	0
1	0	2	15	0	73058,02	235	73.058,02
2	0	0	15	0	48155,40	235	48.155,40
3	0	0	15	0	80745,51	235	80.745,51
4	0	0	15	0	70974,94	235	70.974,94
5	0	0	15	0	73072,40	235	73.072,40
6	0	0	15	0	75037,28	235	75.037,28
7	0	0	15	1	78020,75	235	78.020,75
8	0	0	15	28	92827,75	235	92.827,75
9	0	0	15	4	80068,89	235	80.068,89
10	0	0	15	0	69798,75	235	69.798,75
11	0	0	15	7	81646,55	235	81.646,55
12	0	0	15	11	83557,78	235	83.557,78
<b>Custo Total</b>	<b>14.284.113,02</b>						

Fonte: Solver Excel

Nota-se que o plano que permite a demissão e contratação, apresenta um custo menor para a cooperativa. Vale ressaltar que foi permitido somente demitir 2 pessoas, pelo fato de a linha de produção não poder funcionar com menos de 15 trabalhadores, assim os meses em que demanda não fosse satisfeita somente com o quadro de funcionários, seria preciso realizar hora extra, conforme consta na Tabela 9. Desta maneira, existiria uma redução de custo de R\$14.288,00. Esse cenário mostra, que o solver sempre irá buscar a opção que minimize o custo total, ou seja, se nesta restrição não houvesse o limite de demitir 2 pessoas ele demitiria o máximo possível, desde que atendesse a demanda.

No apêndice E, encontra-se todo o desenvolvimento do solver.

#### 4.6 VERIFICACAO DO MODELO

O relatório de análise de sensibilidade, apresentado no Apêndice F, é dividido em análise de sensibilidade nas células variáveis e a análise de sensibilidade nas restrições.

O primeiro cenário, com a força de trabalho constante e a nova demanda de potência, mostra que o custo reduzido das variáveis ou é positivo ou igual a zero, ou seja, as variáveis fazem parte da solução e não há folga nenhuma. Exceto a variável

dos trabalhadores demitidos, pois, esta apresenta um custo reduzido negativo, ou seja, mostra que devido a capacidade da cooperativa, está 'sobrando' trabalhadores para a produção. Quanto a permissão de aumentar ou reduzir, sem modificar a solução ótima, a única variável que permite aumentar o seu custo é a da força de trabalho, apresentando um aumento diferente em cada período, conforme exposto no Apêndice F e as variáveis que permitem a redução são as de produção de horas extras, a de produção e a de trabalhadores demitidos. A de trabalhadores demitidos, permite um valor diferente para cada período, enquanto as demais apresentam o mesmo valor para todos os períodos. As variáveis que apresentam valor igual a zero, não podem ser alteradas, pois neste caso a solução ótima também é alterada.

Quanto as restrições, os contratados, produção e horas extras, apresentam sombra preço positivo, ou seja, ao serem aumentadas na restrição acontecerá o aumento na função objetivo. A força de trabalho, por sua vez, apresenta sombra preço negativo, ou seja, se a força de trabalho aumentar, a solução ótima não é alterada, uma vez que o solver interpreta a sobra de trabalhadores devido a capacidade da produção. Isto acontece devido ao fato de ter sido fixado 17 trabalhadores como restrição da cooperativa. Quanto a permissão de aumentar, é possível aumentar o custo da força de trabalho em até R\$0,85 em todos os períodos, os contratados em até R\$0,93 nos oito primeiros períodos, as horas extras em 671,22 horas no oitavo período e em todos os outros em 680 horas, que é o limite máximo que pode ser realizado. Na restrição de produção existe um limite de aumento diferente para cada período. Já na permissão de reduzir, a restrição de contratados não permite redução, devido ao limite fixado pela cooperativa. Quanto a força de trabalho, pode ser reduzida em 0,93 kg nos oito primeiros períodos, enquanto nos outros não pode ser reduzida. E a produção só pode ser reduzida no oitavo período em 4827,76 kg.

No segundo cenário, permitindo contratação e demissão juntamente com a nova demanda de potência, nas variáveis o custo reduzido permanece igual ao cenário anterior. Nota-se que os demitidos, neste cenário, apresentam o custo zero, diferente do cenário anterior, pois, agora a restrição permitiu manter no mínimo 15 trabalhadores não apresentando trabalhadores a mais do que o necessário. Quanto a permissão de aumentar ou reduzir, sem modificar a solução ótima, a única variável que permite aumentar o seu custo é a de trabalhadores demitidos, pois logo no início do período acontece a demissão de 2 trabalhadores. Nos outros períodos, é permitido aumentar o custo na variável força de trabalho em todos os períodos e na variável



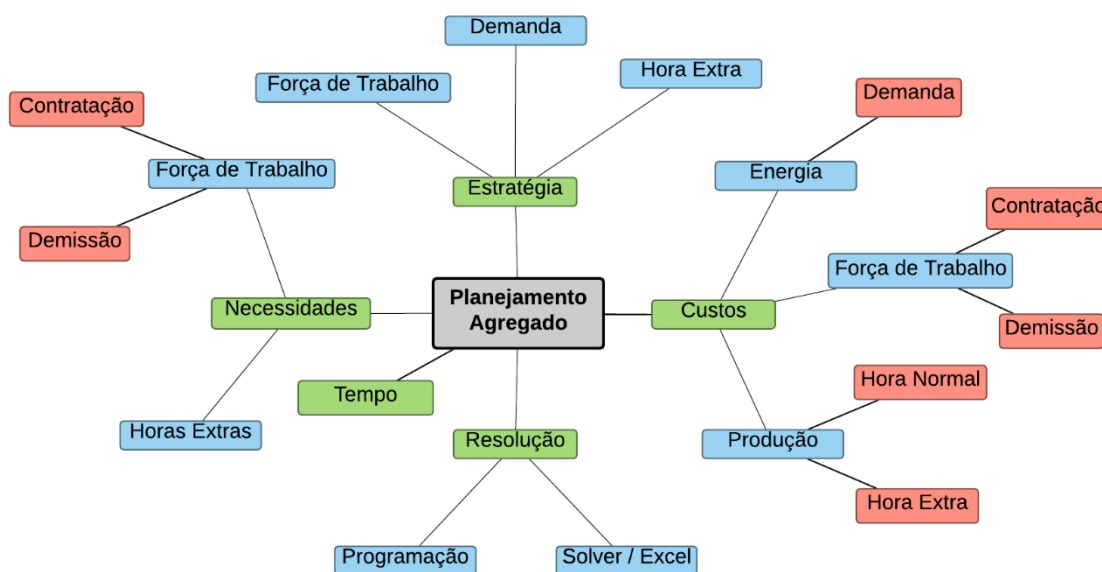
hora extra nos períodos 3, 7, 8, 9, 11 e 12. Todas as variáveis que permitem um limite de redução.

Quanto as restrições e a força de trabalho continuam com sombra preço negativo nos 9 primeiros períodos e no período 12, pois o solver continua considerando a produção menor do que a capacidade em relação aos trabalhadores. Porém, de acordo com o gestor da cooperativa, 15 trabalhadores apresenta o quadro mínimo para a produção acontecer. Por outro lado, os períodos 10 e 11 apresenta sombra preço positivo, ou seja, se ocorrer o aumento da força de trabalho neste período, pode alterar a solução ótima. As outras restrições também apresentam valor positivo ou zero. Quanto ao permitir e reduzir, a força de trabalho permite aumento, exceto no período 11, e nenhum dos períodos permite redução. A produção permite aumento em todos os períodos e redução somente nos períodos 3, 7, 8, 11 e 12. E as horas extras, permitem aumento em todos os períodos, e nenhuma redução.

## 5 DISCUSSÕES

A discussão foi realizada seguindo alguns pontos principais, partindo do planejamento agregado, conforme ilustra o mapa mental na Figura 4.

**Figura 4 - Mapa mental de discussões**



**Fonte: Autoria própria.**

O horizonte de planejamento definido para este estudo foi de 12 meses. Entezaminia, Heydari e Rahmani (2016) afirma que geralmente ele  realizado de 3 a 18 meses. Filho, Cezarino e Ratto (2010), Feng et al. (2011) também realizaram o planejamento com o horizonte de 12 meses. Por outro lado, Kopanos, Georgiadis e Pistikopoulos (2013) utilizaram de um horizonte de somente 5 dias e, Bilgen e Dogan (2015) de 7 dias e 3 semanas, indo contra a literatura citada.

O modelo formulado neste estudo utilizou a estratégia de acompanhamento da demanda, utilizando-se de horas extras e contratao e demissão. A estratégia depende da realidade do local estudado, como  o caso de estudos que consideraram o estoque (Filho, Cezarino e Ratto, 2010; Feng et al., 2011; Kopanos, Georgiadis e Pistikopoulos, 2013; Bilgen e Dogan, 2015; Izadpanahi e Modarres, 2016), a subcontratao (Filho, Cezarino e Ratto, 2010; Kopanos, Georgiadis e Pistikopoulos, 2013; Mehdizadeh, Niaki e Hemati, 2017) e os pedidos em falta (Izadpanahi e Modarres, 2016).

Este trabalho corrobora com a literatura (MEHDIZADEH, NIAKI E HEMATI, 2017), quando o planejamento agregado determinou a quantidade de itens a serem produzidos em hora normal e extra e a necessidade de se manter ou não a força de trabalho constante, assim como Kopanos, Georgiadis e Pistikopoulos (2013) e Bilgen e Dogan (2015) que também determinaram um plano de produção normal. Em contrapartida, Feng et al. (2011) utilizaram o PAP para obter também o lead time de produção.

Este modelo foi formulado como um modelo matemático de programação linear, seguindo a afirmativa de Rajaram e Karmarkar (2012) onde afirmam que modelos de PAP são normalmente formulados como programações lineares que minimizam os custos. Floudas e Lin (2005) afirmam ainda que a programação linear se tornou um dos métodos mais amplamente explorados para planejamento e programação de processos.

O modelo formulado neste estudo, buscou-se a minimização dos custos de produção na medida em que a demanda era atendida. É possível afirmar que na literatura aqui discutida os modelos de planejamento geralmente são modelos que buscam a minimização dos custos por meio de estratégias de acordo com a realidade do local de estudo. Filho, Cezarino e Ratto (2010) consideraram os níveis de estoques, taxas de produção, horas extras, mão-de-obra regular e subcontratação. Feng et al. (2011) utilizaram os custos mínimos de estoque, taxa de produção ideal e taxa de carga de saldo de produção, buscando a minimização. Kopanos, Georgiadis e Pistikopoulos (2013) teve como foco a minimização dos custos de estoque, custos operacionais, custos de preparação de receitas em lote, custos unitários de utilização, custos de mudança de famílias e custos de produção externos. Em contrapartida, Bilgen e Dogan (2015) buscaram maximizar a sua produção, assim como Kadambur e Kotecha (2015) que também tiveram o objetivo de maximizar o lucro ao mesmo tempo que determinava a quantidade e tipo de produto que deveria ser produzido. Desta forma, estes autores vão contra Wang e Liang (2004) que afirmam que os problemas de qualquer um dos modelos de planejamento, só podem ser resolvidos se possuírem o único objetivo de minimizar o custo.

Um trabalho similar a este estudo, é o de Izadpanahi e Modarres (2016), em que incluíram no modelo, custo energético e emissão de carbono. Enquanto este estudo, incluiu a demanda de potência e o custo com energia elétrica. Os autores utilizaram de 3 funções objetivos buscando minimizar o custo operacional, o

energético e a emissão de carbono. Neste trabalho, o modelo buscou minimizar todos os custos ao mesmo tempo. O ponto principal deste estudo foi encontrar o valor ideal de demanda de potência antes de incluí-lo no planejamento agregado. Isso contribui para a literatura, uma vez que, mesmo alguns estudos considerando a energia elétrica em seus custos, não consideram demanda de potência, e conseqüentemente não buscaram a sua redução antes de agregá-la ao modelo. Mehdizadeh, Niaki e Hemati (2017) relatam que os custos do planejamento agregado envolvem o estoque, pedido e o custo de produção, e Steven (2001) complementa com custos unitários relativos a horas normais, horas extras, subcontratação, demissões, ou outros fatores que afetam os custos de forma relevante, ou seja, não considera o custo de energia elétrica envolvido na produção.

Choi e Xirouchakis (2015) minimizaram o consumo de energia ao mesmo tempo em que maximizaram a produção, a partir também de uma função multiobjetivo. Mouzon et al. (2007) buscaram a minimização da energia utilizadas pelos equipamentos de produção a partir da programação matemática, similar ao estudo de Rager et al. (2015) que diminuiram o uso da energia na produção minimizando a demanda de energia final das máquinas envolvidas no processo. Já Santiago et al. (2015) e Chatuberde (2017) objetivaram minimizar a energia nas instalações do processo e dos recursos compartilhados do planejamento agregado. Em contrapartida a esses estudos citados, o estudo aqui buscou incluir a demanda de potência no planejamento, considerando a minimização do seu custo a partir de uma equação antes de somar este custo aos outros existentes. Ao incluir o custo de energia elétrica e demanda de potência no planejamento agregado, o modelo proposto contribui não só para a literatura, mas também para as empresas ligadas no sistema elétrico em alta tensão que precisam contratar demanda de potência previamente.

É importante destacar que os modelos encontrados na literatura apresentam uma programação de produção baseada em dados estocásticos. O modelo aqui proposto é desenhado para ambientes de mercado com incertezas.

## 6 CONSIDERACOES FINAIS

Este estudo possuiu como objetivo a proposição de um modelo de planejamento agregado integrando o custo com energia elétrica e demanda de potência. O modelo inova em três aspectos. O primeiro é a inclusão do custo da demanda de potência contratada no planejamento agregado. O segundo refere-se à técnica de definição da demanda de potência a ser contratada com base no princípio do menor custo. O terceiro é o tratamento de incertezas na previsão de demanda de produção, com a participação do decisor.

A aplicação do modelo foi realizada em uma cooperativa do ramo alimentício de pequeno porte. Entretanto, o modelo serve para qualquer empresa de pequeno, médio ou grande porte, que tenha a necessidade de contratar demanda de potência previamente e apresente um elevado grau de incerteza no mercado. Estas são as principais delimitações do modelo proposto. Apesar de ter sido aplicado em um negócio com características de produção sob encomenda, o modelo também pode ser aplicado em negócios de produção para estoque ou projeto sob encomenda.

Uma característica da indústria onde foi aplicado o modelo, é que os clientes geralmente confirmam seus pedidos alguns dias antes da expedição, ou seja, tais pedidos podem ser alterados. Dessa maneira, a sugestão seria gerar um plano de produção todo fim de mês, mas como a demanda de potência deve ser contratada previamente por um longo período, isso não se torna possível. Assim, para esses casos, a sugestão é que a previsão de demanda de potência seja revisada, caso o contrato permita, para reduzir o período e gerar um plano com número menor de meses. Ou ainda, integrar a equação da demanda de potência na resolução do planejamento agregado, de modo que, ao resolvê-lo, seja apresentada a melhor opção. Outra sugestão é calcular a demanda de potência no Planejamento Mestre de Produção (PMP).

## REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010. **Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ren-414>> Acesso em: 29 mai. 2019.
- ANTHONY, R. N. **Planning and Control Systems: a framework for analysis**, Harvard University Press. 1995.
- ARRUDA JUNIOR, O. R. **Planejamento tático da produção agroindustrial com fluxo divergente e produção em dois estágios**. São Paulo, 2014. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção. 2014.
- BARAKAT, E. H.; QAYYUM, M. A.; HAMED, M. N.; AL-RASHED, S. A. Short-Term Peak Demand Forecasting in Fast Developing Utility with Inherent Dynamic Load Characteristics. **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol.5, pp.813-824, 1990.
- BAZARAA, M.; JARVIS, J.; SHERALI, H. **Linear Programming and Network Flows**, Wiley Interscience, 2005.
- BIEL, K., GLOCK, CH. Systematic literature review of decision support models for energyefficient production planning. **Computers & Industrial Engineering**. v 101, p. 243-25. 2016.
- BILGEN, B.; DOGAN, K. Multistage Production Planning in the Dairy Industry: A Mixed-Integer Programming Approach. **Industrial & Engineering Chemistry Research**. v 54, p. 11709-11719. 2015.
- BNDES, Departamento de Pesquisa Econômica. **Perspectivas DEPEC 2018: O crescimento da economia brasileira 2018-2023**. Disponível em: <[https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14760/1/Perspectivas%202018-2023\\_P.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14760/1/Perspectivas%202018-2023_P.pdf)> Acesso em: 08 de Mai. 2019.
- BUFFA, E. S.; SARIN, R. K. **Modern production / operations management**. 8. ed. Los Angeles: John Wiley & Sons, 1987.
- BUTLER, J.; JIA, J.; DYER, J. Simulation techniques for the sensitivity analysis of multi-criteria decision models. **European Journal of Operational Research**, London, v.103, p.531-546, 1997
- CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). **Considerações sobre Qualis Periódicos: Engenharias III**. 2016. Disponível em: <<http://capes.gov.br>>. Acesso em: 08 mai. 2018.
- CHATURVEDI, N. D. Minimizing energy consumption via multiple installations aggregate production planning Clean Technologies and Environmental. **Policy**. v 19, p. 1977-1984. 2017.

- CHEN, J. F.; LO, S. K.; DO, Q. H. Forecasting Monthly Electricity Demands: An Application of Neural Networks Trained by Heuristic Algorithms. **Neural Computing and Applications**. 2017.
- CHIEN, C. F.; CHEN, Y. J.; PENG, J. T. Manufacturing intelligence for semiconductor demand forecast based on technology diffusion and product life cycle. **International Journal of Production Economics**, v. 128, n. 2, p. 496-509, jul. 2010.
- CHOI, Y. C. & XIROUCHAKIS, P. A production planning in highly automated manufacturing system considering multiple process plans with different energy requirements. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v 70, 5-8, p. 853-867. 2014.
- CHOI, Y. C.; XIROUCHAKIS, P. A holistic production planning approach in a reconfigurable manufacturing system with energy consumption and environmental effects. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. p. 379-394. 2015.
- CHRISTOU, I. T.; LAGODIMOS, A. G.; LYCOPOULOU, D. Hierarchical production planning for multi-product lines in the beverage industry. **Production Planning & Control: The Management of Operations**. Vol 18, No. 5, p 367-376. 2007.
- COPEL - **Companhia Paranaense de Energia - Manual da Eficiência energética**. 2005. Disponível em: <<http://www.copel.com>>. Acesso em 04 jun. 2017.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, G. N.; CAON, M. **Planejamento, programação e controle da produção**. 4. ed. Atlas. São Paulo, 2001.
- CORTI, D.; POZZETTI, A.; ZORNINI, M. A capacity-driven approach to establish reliable due dates in a MTO environment. **International Journal of Production Economics**, vol. 104, pág. 536-554, 2006.
- DAVIS, M. M.; AQUILANO, N.J.; CHASE, R. B. **Fundamentos da administração da produção**. 3. ed. Editora Bookman. Porto Alegre, 2001.
- DICKEY, D.; FULLER, W. A. Distribution of the Estimates for Autoregressive Time Series with a Unit Root. **Journal of the American Statistical Association**, n.74, p.427-31, June 1979.
- ENTEZAMINIA, A.; HEYDARE, M.; RAHMANI, D. A multi-objective model for multi-product multi-site aggregate Production planning In a green supply chain: Considering collection and recycling centers. **Journal of Manufacturing Systems**. v 40, p. 63-75. 2016.
- FENG, P. F.; ZHANG, J. F.; WU, Z. J. & YU, D. W. An improved production planning method for process industries. **International Journal of Production Research**. v 49, p 4223-4243. 2011.
- FERNANDES, F. C. F.; GODINHO FILHO, M. **Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial**. ed única. São Paulo: Atlas, 2010.

FERNANDES, F. C. F.; AZEKA, F.; BARRETO, M. C. M.; FILHO, M. G. Identifying production planning and control top authors: analysis of a survey. **Int. J. Business Innovation and Research**, Vol. 3, No. 5, 2009.

FILHO, F. H. B. **A crise econômica de 2014/2017. Estudos avançados.** vol.31 no.89 São Paulo Jan./Apr. 2017.

FILHO, O. S. S.; CEZARINO, W.; RATTO, J. Aggregate Production Planning: Modeling and Solution via Excel Spreadsheet and Solver. **Management and Control of Production Logistics.** University of Coimbra, Portugal. v 43, Issue 17, p. 89-94. 2010.

FLOUDAS, C. A.; LIN, X. Mixed integer linear programming in process scheduling: modelling, algorithms and applications. **Annals of Operations Research.** v 139, p. 131-162. 2005.

GODINHO FILHO, M. F. **Paradigmas estratégicos de gestão da manufatura.** Paradigmas estratégicos de gestão da manufatura. 267 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos (UFSC), 2004.

GOLARI, M.; FAN, N.; JIN, T. Multistage Stochastic Optimization for Production-Inventory Planning with Intermittent Renewable Energy. **Production and Operations Management.** v 26, n. 3, p. 409-425. 2017.

HAIDA, T.; MUTO, S. Regression Based Peak Load Forecasting Using a Transformation Technique. **IEEE Transaction on Power System**, Vol.9, pp.1788-1794, 1994.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução a Pesquisa Operacional.** Tradução de Ariovaldo Griesi. 8. ed. São Paulo, McGraw-Hill, 2006.

HOLT, C. C. **Forecasting Trends and Seasonals by Exponentially Weighted Averages.** ONR Memorandum, n. 52, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, USA, 1957.

IPEA, BP. **Energia no Brasil e no mundo, parte 1.** Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2008. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par1\\_cap2.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf)>. Acesso em: 10 mai. 2018.

IZADPANAHI, E.; MODARRES, M. Aggregate production planning by focusing on energy saving: A robust optimization approach. **Journal of Cleaner Production.** V 133. 2016.

KADAMBUR, R., KOTTECHA, P. Optimal Production Planning in a Petrochemical Industry using Multiple Levels. **Computers & Industrial Engineering.** v 100, p. 133-143. 2015.



KARMAKAR, U. S.; RAJARAM, K. Aggregate production planning for process industries under oligopolistic competition. **European Journal of Operational Research**. v 223, p. 680-689. 2012.

KOPANOS, G. M.; GEORGIADIS, M. C. & PISTIKOPOULOS, E. N. Energy production planning of a network of micro combined heat and power generators. **Applied Energy**. v 102, p. 1522-1534. 2013.

LAND, M.; GAALMAN, G. Workload control concepts in job shops: A critical assessment. **International Journal of Production Economics**, vol. 46, pág. 535 - 538, 1996.

LATIFOGLU, C.; BELOTTI, P. & SNYDER, L. V. Models for Production Planning under Power Interruptions Naval. **Research Logistics**. v 60, p. 413-431. 2013.

LAWTON, R. How Should Additive Holt-Winters Estimates Be corrected? **International Journal of Forecasting**, v.14, n.3, p.393-403, 1998.

LUSTOSA, L.; MESQUITA, M. A; QUELHAS, O.; OLIVEIRA, R. J. **Planejamento e Controle da Produção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

MALCZEWSKI, J. **GIS and multicriteria decision analysis**. New York: John Wiley, 1999. 362p

MASOUMEH, K. Z.; MUSTAPHA, N.; DAOUD, A. K. 2010. A multi-stage stochastic programming approach for production planning with uncertainty in the quality of raw materials and demand. **International Journal of Production Research**. v 48, p. 4701-4723. 2010.

MEHDIZADEHA, E.; NIAKI, S. T. A.; HEMATI, M. A bi-objective aggregate production planning problem with learning effect and machine deterioration: Modeling and solution. **Computers and Operations Research**. v 91, p. 21-36. 2017.

MME (Ministério de Minas e Energia). **Balanco Energético Nacional (BEN)**. Brasília, 1998. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 14 mai. de 2018.

MME (Ministério de Minas e Energia). **Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro**: Março de 2018. 2018. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/1138781/1435504/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Mar%C3%A7o+-+2018\\_1.pdf/a87b8720-c030-4bfa-8c10-e19cb8d2854c](http://www.mme.gov.br/documents/1138781/1435504/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Mar%C3%A7o+-+2018_1.pdf/a87b8720-c030-4bfa-8c10-e19cb8d2854c)>. Acesso em: 10 mai. 2018.

MODARRES M, IZADPANAHI E, Aggregate production planning by focusing on energy saving: A robust optimization approach. **Journal of Cleaner Production**. doi: v 133, p. 1074-1085. 2016.

MOREIRA JUNIOR, J. C. **Programação linear no planejamento agregado de produção e vendas de uma indústria siderúrgica**. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, 2009.

MOUZON, G.; YILDIRIM, M. B.; TWOMEY, J. Operational methods for minimization of energy consumption of manufacturing equipment. **International Journal of Production Research**. v 45, p. 4247-4271. 2007.

NAHMIAS, S. **Production and operations analysis**. Hoewood: Irwin, 1995.

NARASIMHAN, S. L.; McLEAVEY, D.W; BILLINGTON, P. J. **Production Planning and Inventory Control**. 2nd ed. [S.l]: Prentice Hall, 1995.

PAGANI, R.N., KOVALESKI, J.L. & RESENDE, L.M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**. v 105, Issue 3, p. 2109-2135. 2015.

PAPALARDO, F. **A eficácia do planejamento e controle da produção na indústria analisado pela metodologia da lógica paraconsistente anotada tri valorada**. Doutorado (Tese) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista. São Paulo, 2016.

PIZZOLATO, N. D.; GANDOLPHO, A. A. **Técnicas de otimização**. Volume único. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

POSSEBON, A. P. **Uma análise comparativa do planejamento, programação e controle de produção e dos materiais em uma empresa tipo MTO e MTS: um estudo de caso múltiplo**. Dissertação (mestrado). Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, 2013.

PROCEL - EPP. **Manual de tarifação de energia elétrica**. Rio de Janeiro. 2011. Disponível em:  
<[http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel\\_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf)>. Acesso em: 06 jun. 2018.

RAGER, M; GAHM, C; DENZ, F. Energy-oriented scheduling based on Evolutionary Algorithms. **Computers and Operations Research**. v 54, p. 218-231. 2015.

RAGSDALE, CLIFF T. **Modelagem e análise de decisão**. Volume único. São Paulo: Cengage. Learning, 2011.

RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. **Administração da Produção e Operações**. Tradução roberto Galman; revisão técnica Carlos Eduardo Mariano da Silva. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.  
RUSSOMANO, V. H. PCP: **Planejamento e Controle da Produção**. 5. ed. São Paulo: Pioneira, p. 320,1995.

SAAD, G. **An overview of production planning model: structure classification and empirical assessment**. 1982.

SAKALLI, U. S.; BAYKOÇ, O. F.; BIRGOREN, B. A possibilistic aggregate production planning model for brass casting industry. **Production Planning & Control**. Vol. 21, No. 3, April 2010.

SANTIAGO, G. C. A.; DEL SER, J.; UPTON, C.; QUILLIGAN, F.; GIL-LOPEZ, S. & SALCEDO-SANZ, S. A random-key encoded harmony search approach for energy-efficient production scheduling with shared resources. **Engineering Optimization**, v 47, Issue 11, p. 1481-1496. 2015.

SINGH, A. K.; KHATOON, I. S.; MUAZZAM, Md. An Overview of Electricity Demand Forecasting Techniques. **National Conference on Emerging Trends in Electrical, Instrumentation & Communication Engineering**. Network and Complex Systems ISSN 2224-610X (Paper) ISSN 2225-0603 (Online) Vol.3, No.3, 2013.

SIPPER, D.; BULFIN Jr., R. L. **Production: Planning, Control, and Integration**. New York: McGraw-Hill, 1998.

SIPPER, D.; BULFIN, R. **Production: Planning, Control and Integration**. New York, USA: McGraw-Hill, 1997.

SLACK, N. **Vantagem competitiva em manufatura: Atingindo competitividade nas operações industriais**. 1. Ed. São Paulo, Atlas 1993.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2006.

SOBOTTKA, T; KAMHBER, F; SIHN, W. Increasing energy efficiency in production environments through an optimized, hybrid simulation-based planning of production and its periphery. **The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering**. v 61, p. 440-445. 2017.

STEVENSON, W. J. **Administração de Operações de Produção**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TECHAWIBOONWONG, A.; YENRADEE, P. Aggregate Production Planning Using Spreadsheet Solver: Model and Case Study, **Science-Asia**, 28, p. 291-300. 2002.

TRATAR, L. F.; MOJŠKERC, B.; TOMAN, A.. Demand forecasting with fourparameter exponential smoothing. **International Journal of Production Economics**, v. 181, p. 162-173, ago. 2016.

TUBINO, D. F. **Manual de Planejamento e Controle da Produção**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

VIANA, A. N. C. V.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI O. J.; YAMACHITA R. A. **Eficiência energética:**

fundamentos e aplicações. 1. ed. Elektro. Universidade Federal de Itajubá. Excen. Fupai. Campinas, SP, 2012.

WANG, R.C.; LIANG, T.F. Application of fuzzy multiobjective linear programming to aggregate production planning. *Computers and Industrial Engineering*, 46, 17-41. **International Journal of Production Research**, 20, 105-114. 2004.

WINTERS, P. R. Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages. **Management Science**, v. 6, n.3, p.324-342, 1960.

ZHANG, H.; DAI, Z. W.; ZHANG, W. Y.; ZHANG, S.; WANG, Y.; LIU, R. Y. A New Energy-Aware Flexible Job Shop Scheduling Method Using Modified Biogeography-Based Optimization. **Mathematical Problems in Engineering**. v 2017, p. 12. 2017.

## **APÊNDICE A - Dados Coletados**

**Histórico do consumo de demanda de potência**

Meses	Potência (kw)	Meses	Potência (kw)	Meses	Potência (kw)	Meses	Potência (kw)	Meses	Potência (kw)
jan/14	204	jan/15	240	jan/16	252	jan/17	259	jan/18	221
fev/14	216	fev/15	252	fev/16	252	fev/17	245	fev/18	201
mar/14	264	mar/15	240	mar/16	252	mar/17	235	mar/18	211
abr/14	240	abr/15	240	abr/16	252	abr/17	245	abr/18	202
mai/14	216	mai/15	252	mai/16	264	mai/17	250	mai/18	202
jun/14	216	jun/15	264	jun/16	252	jun/17	264	jun/18	206
jul/14	228	jul/15	252	jul/16	252	jul/17	250	jul/18	216
ago/14	252	ago/15	240	ago/16	250	ago/17	259	ago/18	226
set/14	252	set/15	240	set/16	235	set/17	264	set/18	221
out/14	252	out/15	264	out/16	245	out/17	259	out/18	206
nov/14	240	nov/15	276	nov/16	259	nov/17	254	nov/18	216
dez/14	288	dez/15	252	dez/16	254	dez/17	226	dez/18	221

**Histórico de produção de batata**

Ano	Mês	Produção (kg)	Ano	Mês	Produção (kg)
2014	Jan	71.449,80	2014	Jul	172.998,24
	Fev	98.108,06		Ago	170.871,62
	Mar	75.186,06		Set	195.048,08
	Abr	89.184,04		Out	98.406,44
	Mai	51.441,18		Nov	15.5987,16
	Jun	73.104,84		Dez	185.057,78
2015	Jan	163.406,92	2015	Jul	123.069,82
	Fev	122.309,88		Ago	99.924,98
	Mar	160.586,38		Set	77.072,10
	Abr	101.419,64		Out	127.472,06
	Mai	97.440,4		Nov	100.275,86
	Jun	110.822,38		Dez	127.309,30
2016	Jan	94.561,22	2016	Jul	50.575,16
	Fev	102.871,56		Ago	132.796,44
	Mar	145.226,16		Set	84.820,46
	Abr	112.505,82		Out	98.265,96
	Mai	120.193,48		Nov	121.060,3
	Jun	104.055,4		Dez	124.903,44
2017	Jan	108.315,34	2017	Jul	130.865,92
	Fev	67.618,20		Ago	154.074,48
	Mar	85.486,90		Set	136.504,22
	Abr	91.313,48		Out	97.858,3
	Mai	91.153,62		Nov	112.327,76
	Jun	95.449,86		Dez	98.389,48
2018	Jan	52.178,56	2018	Jul	95.340,575
	Fev	15.807,6		Ago	83.872,86
	Mar	90.957,72		Set	75.521,85
	Abr	94.088,215		Out	78.968,54
	Mai	62.223,9		Nov	78.199,93
	Jun	99.377,09		Dez	96.792,86

**Histórico do consumo de energia elétrica**

Meses	Energia (kwh)	Meses	Energia (kwh)	Meses	Energia (kwh)	Meses	Energia (kwh)	Meses	Energia (kwh)
jan/14	66203	jan/15	83532	jan/16	70272	jan/17	86027	jan/18	79529
fev/14	75792	fev/15	100980	fev/16	89592	fev/17	82935	fev/18	34769
mar/14	59220	mar/15	89136	mar/16	88008	mar/17	68050	mar/18	69184
abr/14	74364	abr/15	78108	abr/16	85044	abr/17	82784	abr/18	76301
mai/14	59832	mai/15	75420	mai/16	87216	mai/17	75050	mai/18	71020
jun/14	65304	jun/15	92784	jun/16	87636	jun/17	89838	jun/18	70393
jul/14	94164	jul/15	91308	jul/16	53832	jul/17	93682	jul/18	79856
ago/14	102504	ago/15	84912	ago/16	89736	ago/17	102359	ago/18	73906
set/14	99948	set/15	70188	set/16	66703	set/17	102745	set/18	73524
out/14	52356	out/15	95364	out/16	77791	out/17	69419	out/18	72326
nov/14	84516	nov/15	81852	nov/16	95322	nov/17	88272	nov/18	72262
dez/14	107928	dez/15	96444	dez/16	88956	dez/17	80510	dez/18	72413

**APÊNDICE B - Comandos utilizados no *Software R Project*.**



Antes de iniciar os comandos no *Software* é preciso dispor no *Excel* em apenas uma coluna todos os dados da demanda coletados e salvar como 'texto (separado por tabulações)'. **Obs:** O *software R* considera uma vírgula (,) como ponto (.), assim os dados precisam estar no *excel* obedecendo esta restrição.

### **No Software**

Carregar livreria, comandos:

```
library(TSA)
require(MASS)
require(tseries)
require(forecast)
```

1 - Importar a tabela de dados - batata.txt que representa a produção de batata dos anos de 2014 a 2018.

```
batata = read.table("batata.txt",header=T)
batata
attach(batata)
```

2- Transformar o conjunto de dados em série temporal

#O argumento "delta" especifica o intervalo de tempo entre as observações para mais detalhes ver função "ts".

```
batata.ts = ts(x, start=c(2014,1), frequency=12)
batata.ts
```

3 - Configurar área de exibição do gráfico

```
par(bg="gray98", cex.axis=0.8, cex.sub=0.8, cex.lab=0.8, cex.main=0.9)
```

4 - Plotar o gráfico produção de batata e verificar o comportamento da série

```
plot(batata.ts, main="Produção de Batata, Jan/2014 à Dez/2018", xlab = "Tempo (ano)", ylab = "Produção (ton)")
```

5 - Plotar o Correlograma da função de Autocorrelação.

```
acf(batata.ts, main="Correlograma" ,xlab="Ordem" , ylab="Autocorrelação")
```

6 - Verificar se a série é estacionária usando o teste de Dickey Fuller (adf.test).

```
adf.test(batata.ts)
```

7 - Decompõe a série em tendência e sazonalidade

```
batata.stl = stl(batata.ts, s.window="per")
```

```
batata.stl
```

8 - Exibe graficamente a decomposição da série em tendência e sazonalidade

```
plot(batata.stl)
```

9 - Dividir a série em 2 conjunto de dados

```
prod1 = batata[1:52,]
```

```
#usada para ajustar o modelo
```

```
prod2 = batata[53:60,]
```

```
#usada para verificar a qualidade das previsões
```

“Caso o comando não seja reconhecido retire a vírgula”

Dados	Produção (kg)	Dados	Produção (kg)
1	71.449,80	31	50.575,16
2	98.108,06	32	132.796,44
3	75.186,06	33	84.820,46
4	89.184,04	34	98.265,96
5	51.441,18	35	121.060,3
6	73.104,84	36	124.903,44
7	172.998,24	37	108.315,34
8	170.871,62	38	67.618,20
9	195.048,08	39	85.486,90
10	98.406,44	40	91.313,48
11	15.5987,16	41	91.153,62
12	185.057,78	42	95.449,86
13	163.406,92	43	130.865,92
14	122.309,88	44	154.074,48
15	160.586,38	45	136.504,22
16	101.419,64	46	97.858,3
17	97.440,4	47	112.327,76
18	110.822,38	48	98.389,48
19	123.069,82	49	52.178,56
20	99.924,98	50	15.807,6
21	77.072,10	51	90.957,72
22	127.472,06	52	94.088,215
23	100.275,86	53	62.223,9
24	127.309,30	54	99.377,09
25	94.561,22	55	95.340,575
26	102.871,56	56	83.872,86
27	145.226,16	57	75.521,85
28	112.505,82	58	78.968,54
29	120.193,48	59	78.199,93
30	104.055,4	60	96.792,86

10 - Transforma os dados em série

```
prod.ts = ts(prod1, start=c(2014,1), frequency=12)
```

11 - Ajustar o modelo

```
prod_ad = HoltWinters(prod.ts, seasonal="additive")
```

```
prod_mult = HoltWinters(prod.ts, seasonal="mult")
```

12 - Previsão 8 passos a frente

```
prev_ad = predict(prod_ad, 8, prediction.interval = TRUE)
```

```
prev_mult = predict(prod_mult, 8, prediction.interval = TRUE)
```

13 - Plota o gráfico da série com os valores previstos e os intervalos de confiança

```
par(mfrow=c(2,1))
```

```
plot (prod_ad, prev_ad, main="Modelo Aditivo Hot-Winters")
```

```
plot (prod_mult, prev_mult, main="Modelo Multiplicativo Hot-Winters")
```

14 - Calcular os erros de previsão e identificar o modelo que resulta na melhor previsão.

**#Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM)**

```
e2_ad = sqrt(mean((prod2-prev_ad[,1])^2))
```

```
e2_ad
```

```
e2_mult = sqrt(mean((prod2-prev_mult[,1])^2))
```

```
e2_mult
```

**#Erro Absoluto Médio (EAM)**

```
e3_ad = mean(abs(prod2-prev_ad[,1]))
```

```
e3_ad
```

```
e3_mult = mean(abs(prod2-prev_mult[,1]))
```

```
e3_mult
```

```
13076,68
```

**#Utilizar os dados previstos para os seis períodos posteriores e os dados do grupo 2 para calcular o MAPE dos modelos aditivos e multiplicativos.**

```
mape_ad=mean(abs(((prod2-prev_ad)/ prod2)*100))
```

```
mape_ad
```

```
62.30858
```

```
mape_mult=mean(abs(((prod2-prev_mult)/ prod2)*100))
```

```
mape_mult
```

```
28.61559
```

**#Fazer os testes gráficos de normalidade e de autocorrelação entre os resíduos**

```
qqnorm(residuals(prod_ad), main="QQ-plot dos Resíduos do Modelo Aditivo")
```

```
qqline(residuals(prod_ad))
```

```
hist(residuals(prod_ad),xlab="Resíduos",ylab="Frequência", main="Histograma dos Resíduos do Modelo Aditivo")
```

```
acf(residuals(prod_ad), main="FAC dos Resíduos do Modelo Aditivo")
```

```
qqnorm(residuals(prod_mult), main="QQ-plot dos Resíduos do Modelo Multiplicativo")
```

```
qqline(residuals(prod_mult))
```

```
hist(residuals(prod_mult),xlab="Resíduos",ylab="Frequência", main="Histograma dos Resíduos do Modelo Multiplicativo")
```

```
acf(residuals(prod_mult), main="FAC dos Resíduos do Modelo Multiplicativo")
```

**#Fazer os testes estatísticos de normalidade**

```
shapiro.test(residuals(prod_ad))
```

```
shapiro.test(residuals(prod_mult))
```

Os dois modelos apresentam normalidade, portanto o modelo a ser escolhido para a previsão de demanda é o multiplicativo por apresentar um menor erro.

**#Exibir os valores dos parâmetros alfa, beta e gama do modelo**

```
prod_ad
```

```
prod_mult
```

```
prev_mult20 = predict (prod_mult, 20, prediction.interval = TRUE)
```

```
prev_mult20
```

## **APÊNDICE C - Tabelas lógica Fuzzy**

<b>Meses</b>	<b>Resposta do Decisor</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>Desfuzificação (%)</b>
Janeiro	5	0	5	10	5
Fevereiro	5	0	5	10	5
Março	3	-10	-5	0	-5
Abril	3	-10	-5	0	-5
Maio	5	0	5	10	5
Junho	5	0	5	10	5
Julho	3	-10	-5	0	-5
Agosto	3	-10	-5	0	-5
Setembro	3	-10	-5	0	-5
Outubro	5	0	5	10	5
Novembro	5	0	5	10	5
Dezembro	5	0	5	10	5

<b>Porcentagem Fuzzy</b>	<b>Valor da Porcentagem</b>	<b>Valor Previsto Fuzzy</b>
5	3478,9535	73.058,02
5	2293,1145	48.155,40
-5	-4249,7635	80.745,51
-5	-3735,523	70.974,94
5	3479,638	73.072,40
5	3573,204	75.037,28
-5	-4106,3555	78.020,75
-5	-4885,671	92.827,75
-5	-4214,152	80.068,89
5	3323,75	69.798,75
5	3887,931	81.646,55
5	3978,942	83.557,78

**APÊNDICE D - Tabela do Cálculo da Demanda de Potência**

Dm	Dc																			
	288	276	264	259	255	254	252	250	245	240	235	228	226	221	216	211	206	204	202	201
288	3784,32	3942	4099,68	4165,38	4217,94	4231,08	4257,36	4283,64	4349,34	4415,04	4480,74	4572,72	4599	4664,7	4730,4	4796,1	4861,8	4888,08	4914,36	4927,5
276	3784,32	3626,64	3784,32	3850,02	3902,58	3915,72	3942	3968,28	4033,98	4099,68	4165,38	4257,36	4283,64	4349,34	4415,04	4480,74	4546,44	4572,72	4599	4612,14
264	3784,32	3626,64	3468,96	3534,66	3587,22	3600,36	3626,64	3652,92	3718,62	3784,32	3850,02	3942	3968,28	4033,98	4099,68	4165,38	4231,08	4257,36	4283,64	4296,78
259	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3455,82	3468,96	3495,24	3521,52	3587,22	3652,92	3718,62	3810,6	3836,88	3902,58	3968,28	4033,98	4099,68	4125,96	4152,24	4165,38
255	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3363,84	3390,12	3416,4	3482,1	3547,8	3613,5	3705,48	3731,76	3797,46	3863,16	3928,86	3994,56	4020,84	4047,12	4060,26
254	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3363,84	3390,12	3455,82	3521,52	3587,22	3679,2	3705,48	3771,18	3836,88	3902,58	3915,72	3994,56	4020,84	4033,98
252	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3337,56	3403,26	3468,96	3534,66	3626,64	3652,92	3718,62	3784,32	3850,02	3915,72	3942	3968,28	3981,42
250	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3350,7	3416,4	3482,1	3574,08	3600,36	3666,06	3731,76	3797,46	3863,16	3889,44	3915,72	3928,86
245	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3285	3350,7	3442,68	3468,96	3534,66	3600,36	3666,06	3731,76	3758,04	3784,32	3797,46
240	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3219,3	3311,28	3337,56	3403,26	3468,96	3534,66	3600,36	3626,64	3652,92	3666,06
235	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	3179,88	3206,16	3271,86	3337,56	3403,26	3468,96	3495,24	3521,52	3534,66
228	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	3022,2	3087,9	3153,6	3219,3	3285	3311,28	3337,56	3350,7
226	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	3035,34	3101,04	3166,74	3232,44	3258,72	3285	3298,14
221	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2969,64	3035,34	3101,04	3127,32	3153,6	3166,74
216	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2838,24	2903,94	2969,64	2995,92	3022,2	3035,34
211	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2838,24	2772,54	2838,24	2864,52	2890,8	2903,94
206	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2838,24	2772,54	2706,84	2733,12	2759,4	2772,54
204	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2838,24	2772,54	2706,84	2680,56	2706,84	2719,98
202	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2838,24	2772,54	2706,84	2680,56	2654,28	2667,42
201	3784,32	3626,64	3468,96	3403,26	3350,7	3337,56	3311,28	3285	3219,3	3153,6	3087,9	2995,92	2969,64	2903,94	2838,24	2772,54	2706,84	2680,56	2654,28	2641,14
TOTAL R\$	75686,4	72848,16	70325,28	69405,48	68774,76	68643,36	68433,12	68275,44	68012,64	67881,24	67881,24	68065,2	68170,32	68564,52	69090,12	69747,12	70482,96	70903,44	71323,92	71560,44



## **APENDICE E - Resolução do Planejamento Agregado no Solver**

## Resolução do planejamento agregado, cenário atual

Salvamento Automático PA - Cópia - Salvando... Camila Matos

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Ajuda Pesquisar

Calibri 11 A<sup>+</sup> A<sup>-</sup> Quebrar Texto Automaticamente

Fonte Alinhamento Número Estilos Células Edição

Variáveis								Restrições		
Período	T contratados	T demitidos	T Força de trabalho	HT	Ut	Demanda de Potência	demanda produção	Força de trabalho	Produção	Horas extras
0	0	0	17	0	0	0	0	0	14941,97	680
1	0	0	17	0	73058,02	255	73.058,02	0	39844,59	680
2	0	0	17	0	48155,40	255	48.155,40	0	7254,48	680
3	0	0	17	0	80745,51	255	80.745,51	0	17025,05	680
4	0	0	17	0	70974,94	255	70.974,94	0	14927,59	680
5	0	0	17	0	73072,40	255	73.072,40	0	12962,71	680
6	0	0	17	0	75037,28	255	75.037,28	0	9979,24	680
7	0	0	17	0	78020,75	255	78.020,75	0	0	671,2222545
8	0	0	17	9	92827,75	255	92.827,75	0	7931,1	680
9	0	0	17	0	80068,89	255	80.068,89	0	18201,24	680
10	0	0	17	0	69798,75	255	69.798,75	0	6353,44	680
11	0	0	17	0	81646,55	255	81.646,55	0	4442,21	680
12	0	0	17	0	83557,78	255	83.557,78	0		

Custos

Período	Contratados	Demitidos	HORAS NORMAIS	Horas extras	Direto	Energia elétrica	Potência
1	0	0	36584	0	1095870,3	17533,9248	3350,7
2	0	0	36584	0	722331	11557,296	3350,7
3	0	0	36584	0	1211182,65	19378,9224	3350,7
4	0	0	36584	0	1064624,1	17033,9856	3350,7
5	0	0	36584	0	1096086	17537,376	3350,7
6	0	0	36584	0	1125559,2	18008,9472	3350,7
7	0	0	36584	0	1170311,25	18724,98	3350,7
8	0	0	36584	206,5403505	1392416,25	22278,66	3350,7
9	0	0	36584	0	1201033,35	19216,5336	3350,7
10	0	0	36584	0	1046981,25	16751,7	3350,7
11	0	0	36584	0	1224698,25	19595,172	3350,7
12	0	0	36584	0	1253366,7	20053,8672	3350,7
Custo Total			14301554,61				

LIVRO Planilha1 Planilha1 (2) Planilha1 (3) Contratação e demissão sem (3)

Salvamento Automático PA - Cópia - Salvando... Camila Matos

Arquivo Página Inicial Inserir Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Ajuda

Obter Dados Obter e Transformar Dados Consultas e Conexões Classificar e Filtrar

Obter e Transformar Dados Consultas e Conexões Classificar e Filtrar

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:  $SC534$

Para:  Máx.  MÍN.  Valor de: 0

Alterando Células Variáveis:  $SB55:SF516$

Sujeito às Restrições:

- $SB54:SB516 = 0$
- $SC55:SC516 = 0$
- $SF55:SF516 = SH55:SH516$
- $SI55:SI516 = 0$
- $SL55:SL516 >= 0$
- $SL55:SL516 >= 0$

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução: LP Simplex

Método de Solução: Seleccione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Seleccione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Seleccione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolva Fechar

Período	Contratados	Demitidos	HORAS NORMAIS	Horas extras	Direto	Energia elétrica	Potência
1	0	0	36584	0	1095870,3	17533,9248	3350,7
2	0	0	36584	0	722331	11557,296	3350,7
3	0	0	36584	0	1211182,65	19378,9224	3350,7
4	0	0	36584	0	1064624,1	17033,9856	3350,7
5	0	0	36584	0	1096086	17537,376	3350,7
6	0	0	36584	0	1125559,2	18008,9472	3350,7
7	0	0	36584	0	1170311,25	18724,98	3350,7
8	0	0	36584	206,5403505	1392416,25	22278,66	3350,7
9	0	0	36584	0	1201033,35	19216,5336	3350,7
10	0	0	36584	0	1046981,25	16751,7	3350,7
11	0	0	36584	0	1224698,25	19595,172	3350,7
12	0	0	36584	0	1253366,7	20053,8672	3350,7

LIVRO Planilha1 Planilha1 (2) Planilha1 (3) Contratação e demissão sem (3)

## Resolução do planejamento agregado, cenário atual com força de trabalho constante e nova demanda de potência proposta

Período	Variáveis						Restrições			
	Ttc contratados	Ttd Demitidos	Tt Força de trabalho	Ht Produção em Horas extras	Ut Produção	Demanda de Potência	demanda produção	Tt Força de trabalho	Ut Produção	Horas extras
0	0	0	17	0	0	235	0	0	14941,97	680
1	0	0	17	0	73058,02	235	73.058,02	0	39844,59	680
2	0	0	17	0	48155,40	235	48.155,40	0	7254,48	680
3	0	0	17	0	80745,51	235	80.745,51	0	17025,05	680
4	0	0	17	0	70974,94	235	70.974,94	0	14927,59	680
5	0	0	17	0	73072,40	235	73.072,40	0	12962,71	680
6	0	0	17	0	75037,28	235	75.037,28	0	9979,24	680
7	0	0	17	0	78020,75	235	78.020,75	0	0	671,2222545
8	0	0	17	9	92827,75	235	92.827,75	0	7931,1	680
9	0	0	17	0	80068,89	235	80.068,89	0	18201,24	680
10	0	0	17	0	69798,75	235	69.798,75	0	6353,44	680
11	0	0	17	0	81646,55	235	81.646,55	0	4442,21	680
12	0	0	17	0	83557,78	235	83.557,78	0		

Período	Custos						
	Ctc Contratados	Ctd Demitidos	Ctm HORAS NORMAIS	Cth Horas extras	Ctu Direto	Potência Energia elétrica	
1	0	0	36584	0	1095870,3	17533,9248	3087,9
2	0	0	36584	0	722331	11557,296	3087,9
3	0	0	36584	0	1211182,65	19378,9224	3087,9
4	0	0	36584	0	1064624,1	17033,9856	3087,9
5	0	0	36584	0	1096086	17537,376	3087,9
6	0	0	36584	0	1125559,2	18008,9472	3087,9
7	0	0	36584	0	1170311,25	18724,98	3087,9
8	0	0	36584	206,5403505	1392416,25	22278,66	3087,9
9	0	0	36584	0	1201033,35	19216,5336	3087,9
10	0	0	36584	0	1046981,25	16751,7	3087,9
11	0	0	36584	0	1224698,25	19595,172	3087,9
12	0	0	36584	0	1253366,7	20053,8672	3087,9
Custo Total			14298401,01				

**Parâmetros do Solver**

Definir Objetivo:

Para:  Máx.  Mín.  Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- $B54:B516 = 0$
- $C55:C516 = 0$
- $F55:F516 = S55:S516$
- $S55:S516 = 0$
- $S55:S516 >= 0$
- $S55:S516 >= 0$

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução: LP Simplex

Resolva

## Resolução do planejamento agregado, cenário proposto com contratação e demissão e a nova demanda de potência

Variáveis								Restrições				
Período	T contratados	T Demitidos	T Força de trabalho	Ht	Ut	Produção em Horas extras	Produção	Demanda de Potência	demanda produção	Força de trabalho	Produção	Horas extras
1	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	2	15	0	73058,02	235	73.058,02	0	0	4589,03	600
3	2	0	0	15	0	48155,40	235	48.155,40	0	0	29491,65	600
4	3	0	0	15	6	80745,51	235	80.745,51	0	0	594,3664364	600
5	4	0	0	15	0	70974,94	235	70.974,94	0	0	6672,11	600
6	5	0	0	15	0	73072,40	235	73.072,40	0	0	4574,65	600
7	6	0	0	15	0	75037,28	235	75.037,28	0	0	2609,77	600
8	7	0	0	15	1	78020,75	235	78.020,75	0	0	599,3205455	600
9	8	0	0	15	28	92827,75	235	92.827,75	0	0	572,3987273	600
10	9	0	0	15	4	80068,89	235	80.068,89	0	0	595,5966545	600
11	10	0	0	15	0	69798,75	235	69.798,75	0	0	7848,3	600
12	11	8E-16	0	15	7	81646,55	235	81.646,55	0	0	592,7281818	600
13	12	0	0	15	11	83557,78	235	83.557,78	0	0	589,2532182	600

Custos							
Período	Contratados	Demitidos	HORAS NORMAIS	Horas extras	Direto	Energia elétrica	Potência
1	0	0	32280	0	1095870,3	17533,9248	3087,9
2	0	0	32280	0	722331	11557,296	3087,9
3	0	0	32280	132,5577524	1211182,65	19378,9224	3087,9
4	0	0	32280	0	1064624,1	17033,9856	3087,9
5	0	0	32280	0	1096086	17537,376	3087,9
6	0	0	32280	0	1125559,2	18008,9472	3087,9
7	0	0	32280	15,98756545	1170311,25	18724,98	3087,9
8	0	0	32280	649,4579473	1392416,25	22278,66	3087,9
9	0	0	32280	103,6107185	1201033,35	19216,5336	3087,9
10	0	0	32280	0	1046981,25	16751,7	3087,9
11	1,632E-12	0	32280	171,1058818	1224698,25	19595,172	3087,9
12	0	0	32280	252,8717762	1253366,7	20053,8672	3087,9
<b>Custo Total</b>			<b>14284113,02</b>				

**Parâmetros do Solver**

Definir Objetivo:

Para:  Máx.  Mín.  Valor de:

Alterando Células Variáveis:

Sujeito às Restrições:

- \$D\$5:\$D\$16 >= 15
- \$F\$5:\$F\$16 = \$H\$5:\$H\$16
- \$I\$5:\$I\$16 = 0
- \$K\$5:\$K\$16 >= 0
- \$L\$5:\$L\$16 >= 0

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução: LP Simplex

Botões:

## **APENDICE F - Relatórios de Sensibilidade**

Relatório de sensibilidade, cenário atual com a nova demanda de potência proposta

Microsoft Excel 16.0 Relatório de Sensibilidade

Planilha: [PA - Cópia.xlsx]Contratação e demissão sem (2)

Relatório Criado: 19/06/2019 16:18:08

Células Variáveis

Célula	Nome	Final Valor	Reduzido Custo	Objetivo Coeficiente	Permitido Aumentar	Permitido Reduzir
\$B\$5	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$5	T Demitidos	0	-7482,06	18120,48	1E+30	7482,06
\$D\$5	T Força de trabalho	17	0	2152	7482,06	1E+30
\$E\$5	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$5	Produção	73058,02	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$6	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$6	T Demitidos	0	-5330,06	18120,48	1E+30	5330,06
\$D\$6	T Força de trabalho	17	0	2152	5330,06	1E+30
\$E\$6	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$6	Produção	48155,4	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$7	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$7	T Demitidos	0	-3178,06	18120,48	1E+30	3178,06
\$D\$7	T Força de trabalho	17	0	2152	3178,06	1E+30
\$E\$7	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$7	Produção	80745,51	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$8	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$8	T Demitidos	0	-1026,06	18120,48	1E+30	1026,06
\$D\$8	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$8	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$8	Produção	70974,94	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$9	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$9	T Demitidos	0	1125,939	18120,48	1E+30	1125,94
\$D\$9	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$9	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$9	Produção	73072,4	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$10	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$10	T Demitidos	0	3277,939	18120,48	1E+30	3277,94
\$D\$10	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$10	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$10	Produção	75037,28	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$11	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$11	T Demitidos	0	5429,939	18120,48	1E+30	5429,94

\$D\$11	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$11	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$11	Produção	78020,75	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$12	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$12	T Demitidos	0	7581,939	18120,48	1E+30	7581,94
\$D\$12	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$12	Produção em Horas extras	8,7777455	0	23,53	1E+30	23,53
\$F\$12	Produção	92827,75	15,84278	15,8	1E+30	15,8428
\$B\$13	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$13	T Demitidos	0	9512,48	18120,48	1E+30	9512,48
\$D\$13	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$13	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$13	Produção	80068,89	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$14	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$14	T Demitidos	0	11664,48	18120,48	1E+30	11664,5
\$D\$14	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$14	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$14	Produção	69798,75	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$15	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$15	T Demitidos	0	13816,48	18120,48	1E+30	13816,5
\$D\$15	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$15	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$15	Produção	81646,55	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$16	T contratados	0	0	2100	1E+30	1E+30
\$C\$16	T Demitidos	0	15968,48	18120,48	1E+30	15968,5
\$D\$16	T Força de trabalho	17	0	2152	1026,06	1E+30
\$E\$16	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$16	Produção	83557,78	15,8	15,8	1E+30	15,8

## Restrições

		Final	Sombra	Restrição	Permitido	Permitido
				Lateral		
Célula	Nome	Valor	Preço	R.H.	Aumentar	Reduzir
\$B\$4	T contratados	0	0	0	0	1E+30
\$B\$5	T contratados	0	27702,5	0	0,932636	0
\$B\$6	T contratados	0	25550,5	0	0,932636	0
\$B\$7	T contratados	0	23398,5	0	0,932636	0
\$B\$8	T contratados	0	21246,5	0	0,932636	0
\$B\$9	T contratados	0	19094,5	0	0,932636	0
\$B\$10	T contratados	0	16942,5	0	0,932636	0
\$B\$11	T contratados	0	14790,5	0	0,932636	0
\$B\$12	T contratados	0	12638,5	0	0,932636	0
\$B\$13	T contratados	0	10708	0	1E+30	0
\$B\$14	T contratados	0	8556	0	1E+30	0
\$B\$15	T contratados	0	6404	0	1E+30	0
\$B\$16	T contratados	0	4252	0	1E+30	0
			-			
\$J\$5	Força de trabalho	0	25602,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$6	Força de trabalho	0	23450,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$7	Força de trabalho	0	21298,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$8	Força de trabalho	0	19146,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$9	Força de trabalho	0	16994,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$10	Força de trabalho	0	14842,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$11	Força de trabalho	0	12690,5	0	0,858154	0,9326356
			-			
\$J\$12	Força de trabalho	0	10538,5	0	0,858154	0,9326356
\$J\$13	Força de trabalho	0	-8608	0	0,858154	1E+30
\$J\$14	Força de trabalho	0	-6456	0	0,858154	1E+30
\$J\$15	Força de trabalho	0	-4304	0	0,858154	1E+30
\$J\$16	Força de trabalho	0	-2152	0	0,858154	1E+30
\$K\$5	Produção	14941,97	0	0	14941,97	1E+30
\$K\$6	Produção	39844,59	0	0	39844,59	1E+30
\$K\$7	Produção	7254,48	0	0	7254,48	1E+30
\$K\$8	Produção	17025,05	0	0	17025,05	1E+30
\$K\$9	Produção	14927,59	0	0	14927,59	1E+30
\$K\$10	Produção	12962,71	0	0	12962,71	1E+30
\$K\$11	Produção	9979,24	0	0	9979,24	1E+30
\$K\$12	Produção	0	0,04278	0	369172,2	4827,76
\$K\$13	Produção	7931,1	0	0	7931,1	1E+30
\$K\$14	Produção	18201,24	0	0	18201,24	1E+30



\$K\$15	Produção	6353,44	0	0	6353,44	1E+30
\$K\$16	Produção	4442,21	0	0	4442,21	1E+30
\$L\$5	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$6	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$7	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$8	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$9	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$10	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$11	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$12	Horas extras	671,2223	0	0	671,2223	1E+30
\$L\$13	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$14	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$15	Horas extras	680	0	0	680	1E+30
\$L\$16	Horas extras	680	0	0	680	1E+30

Relatório de sensibilidade, cenário proposto com a nova demanda de potência proposta

**Microsoft Excel 16.0 Relatório de Sensibilidade**

Planilha: [PA - Copia.xlsx]Contratação e demissão sem ener

Relatório Criado: 19/06/2019 16:36:13

Células Variáveis

Célula	Nome	Final Valor	Reduzido Custo	Objetivo Coeficiente	Permitido Aumentar	Permitido Reduzir
\$B\$5	T contratados	0	20220,48	2100	1E+30	20220,48
\$C\$5	T Demitidos	2	0	18120,48	413,6848	1738,315
\$D\$5	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$5	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$5	Produção	73058,02	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$6	T contratados	0	18068,48	2100	1E+30	18068,48
\$C\$6	T Demitidos	0	2152	18120,48	1E+30	2152
\$D\$6	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$6	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$6	Produção	48155,4	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$7	T contratados	0	15916,48	2100	1E+30	15916,48
\$C\$7	T Demitidos	0	4304	18120,48	1E+30	4304
\$D\$7	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$7	Produção em Horas extras	5,633564	0	23,53	43,95402	23,53
\$F\$7	Produção	80745,51	15,842782	15,8	1E+30	15,84278
\$B\$8	T contratados	0	13985,939	2100	1E+30	13985,94
\$C\$8	T Demitidos	0	6234,5412	18120,48	1E+30	6234,541
\$D\$8	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$8	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$8	Produção	70974,94	15,8	15,8	1E+30	15,8

\$B\$9	T contratados	0	11833,939	2100	1E+30	11833,94
\$C\$9	T Demitidos	0	8386,5412	18120,48	1E+30	8386,541
\$D\$9	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$9	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$9	Produção	73072,4	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$10	T contratados	0	9681,9388	2100	1E+30	9681,939
\$C\$10	T Demitidos	0	10538,541	18120,48	1E+30	10538,54
\$D\$10	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$10	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$10	Produção	75037,28	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$11	T contratados	0	7529,9388	2100	1E+30	7529,939
\$C\$11	T Demitidos	0	12690,541	18120,48	1E+30	12690,54
\$D\$11	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$11	Produção em Horas extras	0,679455	0	23,53	43,95402	23,53
\$F\$11	Produção	78020,75	15,842782	15,8	1E+30	15,84278
\$B\$12	T contratados	0	5599,3976	2100	1E+30	5599,398
\$C\$12	T Demitidos	0	14621,082	18120,48	1E+30	14621,08
\$D\$12	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$12	Produção em Horas extras	27,60127	0	23,53	43,95402	23,53
\$F\$12	Produção	92827,75	15,842782	15,8	1E+30	15,84278
\$B\$13	T contratados	0	3668,8564	2100	1E+30	3668,856
\$C\$13	T Demitidos	0	16551,624	18120,48	1E+30	16551,62
\$D\$13	T Força de trabalho	15	0	2152	1738,315	413,6848
\$E\$13	Produção em Horas extras	4,403345	0	23,53	43,95402	23,53
\$F\$13	Produção	80068,89	15,842782	15,8	1E+30	15,84278
\$B\$14	T contratados	0	1738,3152	2100	1E+30	1738,315
\$C\$14	T Demitidos	0	18482,165	18120,48	1E+30	18482,16
\$D\$14	T Força de trabalho	15	413,68481	2152	1E+30	413,6848
\$E\$14	Produção em Horas extras	0	23,53	23,53	1E+30	23,53
\$F\$14	Produção	69798,75	15,8	15,8	1E+30	15,8
\$B\$15	T contratados	7,77E-16	0	2100	413,6848	5961,082
\$C\$15	T Demitidos	0	20220,48	18120,48	1E+30	20220,48
\$D\$15	T Força de trabalho	15	5961,0824	2152	1E+30	5961,082
\$E\$15	Produção em Horas extras	7,271818	0	23,53	633,3651	23,53
\$F\$15	Produção	81646,55	15,842782	15,8	1E+30	15,84278
\$B\$16	T contratados	0	4030,5412	2100	1E+30	4030,541
\$C\$16	T Demitidos	0	16189,939	18120,48	1E+30	16189,94
\$D\$16	T Força de trabalho	15	0	2152	16189,94	4030,541
\$E\$16	Produção em Horas extras	10,74678	0	23,53	428,2451	23,53
\$F\$16	Produção	83557,78	15,842782	15,8	1E+30	15,84278

## Restrições

Célula	Nome	Final	Sombra	Restrição	Permitido	Permitido
		Valor	Preço	Lateral	Aumentar	Reduzir
				R.H.		
\$J\$5	Força de trabalho	0	-18120,48	0	2	1E+30
\$J\$6	Força de trabalho	0	-15968,48	0	2	1,78E-15
\$J\$7	Força de trabalho	0	-13816,48	0	2	1,78E-15
\$J\$8	Força de trabalho	0	-11885,94	0	0,598566	1,78E-15
\$J\$9	Força de trabalho	0	-9733,939	0	0,598566	1,78E-15
\$J\$10	Força de trabalho	0	-7581,939	0	0,598566	1,78E-15
\$J\$11	Força de trabalho	0	-5429,939	0	0,598566	0
\$J\$12	Força de trabalho	0	-3499,398	0	0,072192	0
\$J\$13	Força de trabalho	0	-1568,856	0	0,072192	0
\$J\$14	Força de trabalho	0	361,68481	0	0,072192	0
\$J\$15	Força de trabalho	0	2100	0	1E+30	7,77E-16
\$J\$16	Força de trabalho	0	-1930,541	0	1,78E-15	1,141846
\$K\$5	Produção	4589,03	0	0	4589,03	1E+30
\$K\$6	Produção	29491,65	0	0	29491,65	1E+30
\$K\$7	Produção	0	0,0427818	0	326901,5	3098,46
\$K\$8	Produção	6672,11	0	0	6672,11	1E+30
\$K\$9	Produção	4574,65	0	0	4574,65	1E+30
\$K\$10	Produção	2609,77	0	0	2609,77	1E+30
\$K\$11	Produção	0	0,0427818	0	329626,3	373,7
\$K\$12	Produção	0	0,0427818	0	314819,3	15180,7
\$K\$13	Produção	0	0,0427818	0	327578,2	2421,84
\$K\$14	Produção	7848,3	0	0	7848,3	1E+30
\$K\$15	Produção	0	0,0427818	0	326000,5	3999,5
\$K\$16	Produção	0	0,0427818	0	324089,3	5910,73
\$L\$5	Horas extras	600	0	0	600	1E+30
\$L\$6	Horas extras	600	0	0	600	1E+30
\$L\$7	Horas extras	594,3664	0	0	594,3664	1E+30
\$L\$8	Horas extras	600	0	0	600	1E+30
\$L\$9	Horas extras	600	0	0	600	1E+30
\$L\$10	Horas extras	600	0	0	600	1E+30
\$L\$11	Horas extras	599,3205	0	0	599,3205	1E+30
\$L\$12	Horas extras	572,3987	0	0	572,3987	1E+30
\$L\$13	Horas extras	595,5967	0	0	595,5967	1E+30
\$L\$14	Horas extras	600	0	0	600	1E+30
\$L\$15	Horas extras	592,7282	0	0	592,7282	1E+30
\$L\$16	Horas extras	589,2532	0	0	589,2532	1E+30