

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“UM MODELO MATEMÁTICO PARA ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO DO
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA”**

MARIELLEN VITAL DA SILVA

ILHA SOLTEIRA - SP, MARÇO DE 2007.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Um Modelo Matemático para Estudo de Otimização do
Consumo de Energia Elétrica”**

MARIELLEN VITAL DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Francisco Villarreal Alvarado

Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira,
para obtenção do título de Mestre em Engenharia
Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Ilha Solteira – SP

Março/2007

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que por misericórdia sempre esteve ao meu lado, conservando minha saúde e me dando força para lutar e acreditar na vitória.

Agradeço a minha família pelo apoio e confiança que depositaram em mim todos esses anos, me ajudando financeiramente e emocionalmente, incentivando-me nos momentos difíceis e desanimadores.

Ao Prof. Dr. Francisco Villarreal Alvarado pela orientação dedicada a mim e por tudo que me ensinou durante o período que passamos trabalhando.

Ao Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin pela co-orientação e grande auxílio no desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Dr. Evaristo Bianchini Sobrinho pela disposição e entusiasmo ao dar assistência em assuntos de estatística fundamentais para o trabalho.

Ao Prof. Dr. José Maria Yusta Loyo da Universidade de Zaragoza pelo imenso auxílio e fornecimento dos dados da fábrica Virgen de la Corona.

À CAPES pela ajuda financeira concedida através da bolsa de estudo.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos que de alguma forma me ajudaram, proporcionando-me alegrias e fazendo minha vida mais doce e agradável. Em especial agradeço ao amigo Flávio Faria pela disposição quando necessitei de auxílio.

Não tenho palavras para agradecer a todos que Deus colocou em meu caminho, amigos, parentes, professores e familiares, pois sei que sozinha nada seria possível.

RESUMO

Neste trabalho, otimiza-se o funcionamento de uma fábrica desidratadora de forragens localizada na Espanha. Esta possui processos seqüenciados, secagem, produção de fardos de feno e produção de grãos, que para serem realizados consomem quantidades distintas de energia. Estabelecem-se então, os períodos de produção para cada processo, juntamente com a quantidade em toneladas a serem produzidas, sabendo que na Espanha a energia elétrica possui vinte e quatro preços, um para cada hora do dia. É proposto um modelo para a função objetivo, utilizando dados históricos de produção (Ton), consumo (kWh) e tempo (h), que retratará o funcionamento da empresa. Este modelo é obtido por meio de regressão linear múltipla e é implementado utilizando o software Lingo. Os resultados dessa implementação fornecerão as horas totais diárias que cada processo deverá ser realizado, juntamente com a quantidade de toneladas de pacotes de feno e grãos, e o custo diário da energia elétrica para realizar a produção.

Palavras chave: Regressão Linear Simples, Regressão Linear Múltipla, Otimização, Custo de Energia, Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

In this work, optimize of the functioning of a plant that dehydrates fodder plants located in Spain. This possess sequenced processes, drying, production of hay packs and production of grains, which to be carried through consumes distinct amounts of energy. Then, the periods of production for each process are established, together with the amount in tons to be produced, knowing that in Spain the electric energy possess twenty and four prices, one for each hour of the day. It is considered a model for the objective function, by using given historical data of production (Ton), consumption (kWh) and time (h), that the functioning of the company will portray. This model is gotten by means of multiple linear regression and is implemented using software Lingo. The results of this implementation will supply the daily total hours that each process will have to be carried through, with the amount of tons of packages of hay and grains , and the daily cost of the electric energy to carry through the production.

Key Words: Simple Linear Regression, Multiple Linear Regression, Optimization, Cost of Energy, Mixed Integer Linear Programming.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA	12
1.1 – SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	12
1.1.1 – DEMANDA	13
1.1.2 – CONSUMO	13
1.1.3 – HORÁRIO DE PONTA	14
1.1.4 – HORÁRIO FORA DE PONTA	14
1.1.5 – PERÍODO SECO	14
1.1.6 – PERÍODO ÚMIDO	14
1.1.7 – GRUPO A	14
1.1.8 – GRUPO B	15
1.1.9 – TARIFA CONVENCIONAL	15
1.1.10 – TARIFA HORO-SAZONAL AZUL (THA)	16
1.1.11 – TARIFA HORO-SAZONAL VERDE (THV)	17
1.2 – SISTEMA ELÉTRICO ESPANHOL	18
1.2.1 – POOL	19
1.2.2 – PRODUÇÃO EM REGIME COMERCIAL	19
1.2.3 – PRODUÇÃO EM REGIME ESPECIAL	19
1.2.4 – OPERADOR DE MERCADO	20
1.2.5 – CONSUMIDOR À TARIFA REGULADA	20
1.2.6 – COMERCIALIZAÇÃO REGULADA	20
1.2.7 – DISTRIBUIÇÃO	21
1.2.8 – GESTOR TÉCNICO DE SISTEMA	21
1.2.9 – COMERCIALIZAÇÃO LIVRE	21
1.2.10 – TRANSPORTE	22
1.2.11 – CONSUMIDOR QUALIFICADO	22
1.3 – OTIMIZAÇÃO	22
CAPÍTULO 2 – PLANTAS FORRAGEIRAS E FUNCIONAMENTO DA DESIDRATADORA	26
2.1 – FORRAGEM	26
2.2 – PRINCIPAIS GRUPOS DE PLANTAS FORRAGEIRAS	27
2.3 – DESIDRATAÇÃO DA FORRAGEM	28
2.4 – DESIDRATADORA DE FORRAGENS	29
2.5 – PROCESSO DE EMPACOTAR	32

2.6 – PROCESSO DE GRANULAR	32
2.7 – POTÊNCIA INSTALADA	33
 CAPÍTULO 3 – REGRESSÃO LINEAR E EQUAÇÕES DOS PROCESSOS DA FÁBRICA	 36
3.1 – ANÁLISE DE REGRESSÃO	37
3.2 – O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA AJUSTAR UMA RETA DE REGRESSÃO	39
3.3 – COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO SIMPLES	40
3.4 – ANÁLISE DOS PROCESSOS DE EMPACOTAR E GRANULAR UTILIZANDO REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	44
3.4.1 – ANÁLISE DO PROCESSO DE EMPACOTAR E REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	44
3.4.2 – ANÁLISE DO PROCESSO DE GRANULAR E REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	46
3.5 – REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (NO ESPAÇO)	49
3.6 – COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO MÚLTIPLO	50
3.7 – ANÁLISE DOS PROCESSOS DE EMPACOTAR E GRANULAR UTILIZANDO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	52
3.7.1 - ANÁLISE DO PROCESSO DE EMPACOTAR E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	52
3.7.2 - ANÁLISE DO PROCESSO DE GRANULAR E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA	55
 CAPÍTULO 4 - MODELAGEM	 58
4.1 – MODELAGEM DO FUNCIONAMENTO DA FÁBRICA	58
 CAPÍTULO 5 – RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO	 66
5.1 – RESULTADOS	66
5.1.1 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO 60% DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO	67
5.1.2 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO 80% DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO	72
5.1.3 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO 100% DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO	76
 CONCLUSÃO	 81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE A	85
A1 – DADOS DO PROCESSO DE EMPACOTAR	86
A2 – DADOS DO PROCESSO DE GRANULAR	90
A3 – DADOS DO PROCESSO DE EMPACOATAR DIVIDIDOS PELA HORA	93
A4 – DADOS DO PROCESSO DE GRANULAR DIVIDIDOS PELA HORA	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de funcionamento da fábrica.	31
Figura 2.2 - Foto do ciclone.	31
Figura 2.3 - Foto da prensa e empacotadora.	32
Figura 2.4 - Foto das máquinas do processo.	33
Figura 3.1 - Gráficos das correlações.	41
Figura 3.2 - Representação da decomposição da soma de quadrados.	42
Figura 3.3 - Gráfico do processo de empacotar utilizando regressão linear simples.	46
Figura 3.4 - Gráfico do processo de granular utilizando regressão linear simples.	48
Figura 3.5 – Representação dos planos.	50
Figura 3.6 - Gráfico do processo de empacotar utilizando regressão linear múltipla.	55
Figura 3.7 - Gráfico do processo de granular utilizando regressão linear múltipla.	57
Figura 5.1 - Preço Omel em feriados de janeiro para produção de 60%.	68
Figura 5.2 - Preço Tarifa Regulada em feriados de janeiro para produção de 60%.	69
Figura 5.3 - Preço Omel em dias úteis de janeiro para produção de 60%.	69
Figura 5.4 - Preço Tarifa Regulada em dias úteis de janeiro para produção de 60%.	70
Figura 5.5 - Preço Omel em feriados de setembro para produção de 60%.	70
Figura 5.6 - Preço Omel em dias úteis de setembro para produção de 60%.	71
Figura 5.7 - Preço Tarifa Regulada em dias úteis de setembro para produção de 60%.	71
Figura 5.8 - Preço Omel em feriados de janeiro para produção de 80%.	73
Figura 5.9 - Preço Tarifa Regulada em feriados de janeiro para produção de 80%.	73
Figura 5.10 - Preço Omel em dias úteis de janeiro para produção de 80%.	74
Figura 5.11 - Preço Tarifa Regulada em dias úteis de janeiro para produção de 80%.	74
Figura 5.12 - Preço Omel em feriados de setembro para produção de 80%.	75
Figura 5.13 - Preço Omel em dias úteis de setembro para produção de 80%.	75
Figura 5.14 - Preço Tarifa Regulada em dias úteis de setembro para produção de 80%.	76
Figura 5.15 - Preço Omel em feriados de janeiro para produção de 100%.	77
Figura 5.16 - Preço Tarifa Regulada em feriados de janeiro para produção de 100%.	78
Figura 5.17 - Preço Omel em dias úteis de janeiro para produção de 100%.	78
Figura 5.18 - Preço Tarifa Regulada em dias úteis de janeiro para produção de 100%.	79
Figura 5.19 - Preço Omel em feriados de setembro para produção de 100%.	79
Figura 5.20 - Preço Omel em dias úteis de setembro para produção de 100%.	80
Figura 5.21 - Preço Tarifa Regulada em dias úteis de setembro para produção de 100%.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Máquinas do processo de secagem.	34
Tabela 2.2 - Máquinas do processo de empacotar.	34
Tabela 2.3 - Máquinas do processo de granular.	35
Tabela 2.4 - Gasto total de energia.	35
Tabela 4.1 - Corresponde ao processo de empacotar (secar mais empacotar).	59
Tabela 4.2 - Corresponde ao processo de granular (secar mais granular).	59
Tabela 4.3 - Corresponde ao processo de empacotar (secar mais empacotar), durante uma hora.	59
Tabela 4.4 - Corresponde ao processo de granular (secar mais granular), durante uma hora.	59
Tabela 4.5 - Preços de energia elétrica.	62
Tabela 5.1 – Resultados da implementação realizada, utilizando 60% da capacidade da fábrica.	67
Tabela 5.2 – Resultados da implementação realizada, utilizando 80% da capacidade da fábrica.	72
Tabela 5.3 – Resultados da implementação realizada, utilizando 100% da capacidade da fábrica.	77

INTRODUÇÃO

Grande parte das plantas forrageiras é utilizada como alimentação animal e precisa ser preparada antes de ser consumida. Ela necessita passar pelo processo de secagem, pois quando não desidratada o suficiente, tem o risco de intoxicar os animais que a consomem, devido à ingestão de fungos patogênicos. Após a secagem ela pode ser armazenada na forma de fardos ou de grãos.

Analizou-se neste trabalho uma fábrica desidratadora de forragens localizada na Espanha. Esta desidratadora possui três processos: secagem, empacotamento e granulação do feno. O processo de secagem é comum aos outros dois, empacotamento e granulação, sendo estes totalmente independentes, ou seja, se o processo de empacotar for realizado, o de granular não será.

Cada processo consome uma quantidade de energia elétrica diferente e são realizados separadamente. Considerando que na Espanha o preço da energia elétrica pode variar em cada hora do dia, busca-se um melhor desempenho, com menor custo de produção para esta fábrica, reduzindo o custo diário da energia.

A análise da redução do custo de energia elétrica será feita por meio da resolução de um problema de programação linear inteiro misto, buscando um modelo matemático que melhor retrate o funcionamento da fábrica, possibilitando a otimização do custo da energia elétrica para a produtividade. Para esse fim é proposto um modelo para a função objetivo, utilizando dados históricos da produção, consumo e tempo gasto, para descrever o funcionamento da fábrica. Este modelo é obtido usando regressão linear múltipla, o qual é implementado utilizando o software Lingo. Com o resultado desta implementação será obtido o número total de horas que cada

processo deverá ser realizado, juntamente com a quantidade de toneladas de pacotes de feno e de grãos, bem como o custo diário de energia elétrica para realizar a produção.

No primeiro capítulo deste trabalho realiza-se uma breve revisão da literatura. No segundo capítulo descreve-se a fábrica analisada e seu funcionamento. No capítulo seguinte define-se análise de regressão linear simples e múltipla e apresentam-se as equações que serão utilizadas na formação do modelo, observando que as equações obtidas utilizando regressão linear múltipla são mais adequadas que as obtidas utilizando regressão linear simples, por apresentarem melhores resultados para o coeficiente de determinação. No próximo propõe-se um modelo de otimização para o funcionamento da fábrica (relativo ao custo de energia). E finalmente no último capítulo apresentam-se os resultados do trabalho. No apêndice são apresentadas as tabelas de dados dos processos de granular e empacotar fornecidos pela fábrica, contendo dados de produção, consumo e tempo de realização da produção.

CAPÍTULO 1

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma breve noção da estrutura tarifária do Sistema Elétrico Brasileiro e do Sistema Elétrico Espanhol, buscando apresentar algumas diferenças entre elas. Apresenta-se também um pequeno resumo relativo a conceitos básicos sobre Otimização. Estes conceitos foram necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

1.1 - SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

O sistema tarifário de energia elétrica é um conjunto de normas e regulamentos que tem por função estabelecer o custo da eletricidade para os diferentes tipos de consumidores.

O Governo Federal Brasileiro, através do decreto nº 86463 de 13/10/1983, definiu a estrutura tarifária para a energia elétrica no país com base nos custos marginais do setor. Este processo foi iniciado em 1979, com o patrocínio do Banco Mundial e da assistência técnica da Electricité de France – EDF.

Há na estrutura tarifária, dois tipos básicos de faturamento:

- Monômia: faturamento sobre o consumo efetivo de energia (kWh);
- Binômia: além do faturamento sobre o consumo efetivo de energia, acrescenta-se um outro componente que remunera a capacidade colocada à disposição dos consumidores e incorpora preços diferenciados da energia, dependendo do

horário de funcionamento e da época do ano (ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000).

1.1.1 – DEMANDA

Define-se demanda como sendo a média das potências instantâneas (potências consumidas no instante), solicitadas pela unidade consumidora integralizadas em intervalos de 15 minutos.

A demanda média é a relação entre a energia consumida durante um período de tempo definido e o número de horas desse mesmo período (energia / tempo).

$$D_m = kWh / t \quad (1.1)$$

A demanda máxima é a maior demanda verificada durante um período de tempo.

A demanda registrada é o maior valor da demanda efetivamente registrada em intervalos de 15 minutos, durante o período de funcionamento.

A demanda faturada é o valor de demanda efetivamente utilizada para efeito de faturamento.

A demanda contratada é a demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, sendo ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (ANEEL, 2000).

1.1.2 – CONSUMO

É a quantidade de energia ativa efetivamente medida no período de faturamento.

1.1.3 – HORÁRIO DE PONTA

Período definido pela concessionária e composto por três horas diárias consecutivas, exceção aos sábados, domingos e feriados nacionais definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico.

Conforme a área poderá ser das 17h às 20h, das 17h30min às 20h30min ou das 18h às 21h.

1.1.4 – HORÁRIO FORA DE PONTA

Período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

1.1.5 – PERÍODO SECO

Período de sete meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

1.1.6 – PERÍODO ÚMIDO

Período de cinco meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

1.1.7 – GRUPO A

São os consumidores atendidos em tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3kV. As tarifas de demanda e de consumo são aplicadas conforme o contrato de fornecimento.

Este grupo está dividido em quatro subgrupos de acordo com a tensão de fornecimento.

- A1 – para o nível de tensão de 230 kV ou superior;
- A2 – para o nível de tensão de 88 kV a 138 kV;
- A3 – para o nível de tensão de 69 kV;
- A4 – para o nível de tensão de 13,8 kV.

1.1.8 – GRUPO B

São os consumidores atendidos em tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV. É aplicada a tarifa monômnia convencional e dividida em quatro subgrupos de acordo com a utilização de energia.

- B1 – classe residencial e subclasse residencial baixa renda;
- B2 – classe rural, abrangendo diversas subclasses, como agropecuárias, cooperativas;
- B3 – poder público;
- B4 – iluminação pública.

1.1.9 – TARIFA CONVENCIONAL

A tarifa convencional apresenta preços fixos tanto para a demanda quanto para o consumo, independente do mês e do horário de utilização da energia.

O consumo de energia (CA) faturado será aquele verificado pela medição no período de funcionamento. O valor da demanda faturada (DF) será o maior entre os três itens seguintes:

- Demanda contratada (DC), caso haja contrato de fornecimento de energia;

- Demanda máxima registrada (DR) no mês;
- 85% do maior valor de demanda registrada (DR) nos últimos onze meses.

Para determinar o valor da fatura (VF) utiliza-se a expressão:

$$VF = (CATC + DF.TD) \left(\frac{1}{1 - (ICMS)} \right) \quad (1.2)$$

sendo,

CA - Consumo de energia (kWh);

TC - Tarifa de consumo (R\$/kWh);

TD - Tarifa de demanda;

DF - Demanda faturada;

ICMS – Imposto sobre circulação de mercadorias e prestação de serviços.

1.1.10 – TARIFA HORO-SAZONAL AZUL (THA)

A modalidade tarifária horo-sazonal azul, apresenta uma estrutura baseada em quatro preços diferenciados para o consumo de energia (CA), de acordo com os horários do dia, (ponta e fora de ponta) e com os períodos do ano (período seco e período úmido).

Para a demanda, contempla dois preços de acordo com o horário (ponta e fora de ponta).

O consumo a ser faturado será aquele efetivamente medido em um determinado período para cada segmento horo-sazonal. O valor da demanda faturada (DF) será o maior entre os dois itens seguintes:

- Maior potência demandada, verificada na medição em cada segmento horo-sazonal, integralizada a cada intervalo de 15 minutos durante o período de funcionamento. Isso corresponde à demanda registrada (DR);
- Demanda contratada (DC) em cada segmento horo-sazonal.

Os casos de unidades consumidoras classificadas como rural ou sazonal são tratadas como exceções. Nestes casos, a DF será 10% da maior demanda registrada, considerando-se os onze últimos faturamentos.

O valor da fatura (VF) é calculado de acordo com as seguintes equações:

Período seco:

$$VF = (CA_{fs} \cdot TC_{fs} + CA_{ps} \cdot TC_{ps} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (1.3)$$

Período úmido:

$$VF = (CA_{fu} \cdot TC_{fu} + CA_{pu} \cdot TC_{pu} + DF_f \cdot TD_f + DF_p \cdot TD_p) \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (1.4)$$

em que,

f - Índice que indica o horário fora de ponta;

p - Índice que indica o horário de ponta;

s - Índice que indica o período seco;

u - Índice que indica o período úmido.

1.1.11 – TARIFA HORO-SAZONAL VERDE (THV)

A modalidade tarifaria horo-sazonal verde apresenta a mesma estrutura da tarifa azul (THA) para a cobrança do consumo de energia elétrica. Para a demanda, entretanto, contempla apenas um preço, independente do segmento horo-sazonal.

O consumo a ser faturado será aquele efetivamente medido em um determinado período para cada segmento horo-sazonal. O valor da demanda faturada (DF) será o maior entre os dois itens seguintes:

- Maior potência demandada, verificada por medição, integralizada a cada intervalo de 15 minutos durante o período de funcionamento. Isso corresponde à demanda registrada;

- A demanda contratada.

O valor da fatura (VF) é calculado utilizando as seguintes expressões:

Período seco:

$$VF = (CA_{fs} \cdot TC_{fs} + CA_{ps} \cdot TC_{ps} + DF \cdot TD) \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (1.5)$$

Período úmido:

$$VF = (CA_{fu} \cdot TC_{fu} + CA_{pu} \cdot TC_{pu} + DF \cdot TD) \left(\frac{1}{1 - ICMS} \right) \quad (1.6)$$

1.2 - SISTEMA ELÉTRICO ESPANHOL

O modelo do setor de eletricidade da Espanha compreende a existência de dois sistemas: sistema regulado e sistema liberalizado.

No sistema regulado, os consumidores adquirem eletricidade dos distribuidores sob o regime de tarifas reguladas. As empresas de distribuição adquirem eletricidade no mercado grossista, sendo em seguida entregue na rede de distribuição através da rede de transporte. Os negócios de transporte e distribuição têm um caráter de atividades reguladas.

No sistema liberalizado, os consumidores qualificados (com o direito para comprar eletricidade no mercado liberalizado) e os comercializadores, estabelecem bilateralmente as condições para a transação de eletricidade entre si.

As duas grandes características do mercado de eletricidade Espanhol são:

- A existência de um mercado grossista (pool espanhola);
- O fato de, desde Janeiro de 2003, todos os consumidores, poderem escolher o seu comercializador de eletricidade.

1.2.1 - POOL

O mercado grossista espanhol foi criado com a introdução da competição no mercado em 1 de Janeiro de 1998 e engloba um conjunto de transações derivadas da participação dos agentes de mercado nas sessões dos mercados diários e intra-diários.

Os agentes de mercado são as empresas habilitadas para aí atuarem como vendedores ou compradores, nomeadamente as empresas de produção, distribuição e comercialização de eletricidade, assim como os consumidores qualificados ou agentes externos de outros países. Os produtores e consumidores qualificados podem recorrer à pool ou celebrarem contratos bilaterais físicos.

No mercado diário existe um preço por cada hora, determinado em função do preço marginal. As receitas de cada vendedor numa dada hora são calculadas em função da multiplicação entre volume de eletricidade vendido e o preço marginal determinado para aquela hora. O pagamento de cada comprador numa dada hora é calculado em função da multiplicação entre volume de eletricidade comprado e o mesmo preço marginal.

1.2.2 - PRODUÇÃO EM REGIME COMERCIAL

Os produtores em regime convencional são aqueles que vendem a eletricidade a comercializadores ou consumidores qualificados através da pool ou de contratação bilateral.

As unidades de produção com uma potência instalada superior a 50 MW são obrigadas a realizar ofertas através do operador de mercado. As unidades de produção com uma potência instalada entre 1 MW e 50 MW poderão realizar ofertas através do operador de mercado se achar oportuno.

1.2.3 - PRODUÇÃO EM REGIME ESPECIAL

Consideram-se produtores em Regime Especial os produtores que utilizem recursos renováveis com uma potência instalada até 50 MW e a cogeração.

1.2.4 - OPERADOR DE MERCADO

A OMEL - Companhia Operadora de Mercado Espanhol de Eletricidade é um operador do mercado grossista espanhol e uma entidade responsável pela gestão econômica do mercado e do sistema de ofertas de compra e venda de eletricidade.

1.2.5 - CONSUMIDOR À TARIFA REGULADA

Estes consumidores optaram por contratar o fornecimento de eletricidade com a empresa de distribuição que opera na sua zona. Este contrato é estabelecido mediante uma tarifa regulada definida anualmente por Real-Decreto.

1.2.6 - COMERCIALIZAÇÃO REGULADA

A atividade de gestão comercial no mercado regulado é desenvolvida pelas empresas de distribuição, englobando as seguintes obrigações:

- Conexão de novos consumidores na zona de operação da empresa de distribuição;
- Serviço de leitura de contadores;
- Aplicação da tarifa definida legalmente;
- Informação aos consumidores sobre a tarifa mais adequada;
- Implementação de programas de eficiência energética;
- Garantia do nível da qualidade de serviço;
- Apresentação da eletricidade necessária para o desenvolvimento da atividade.

1.2.7 – DISTRIBUIÇÃO

As redes de distribuição, além de servirem o mercado regulado, podem ser utilizadas pelos comercializadores ou consumidores qualificados, mediante o pagamento de uma tarifa de acesso, a qual é definida anualmente pelo governo.

As seguintes empresas prestam o serviço de distribuição de eletricidade no mercado espanhol: Endesa, Iberdrola, Union Fenosa, HC Energia e Viesgo. Cada empresa recebe uma remuneração pela prestação do serviço de distribuição, definida numa base anual através de Real-Decreto.

1.2.8 - GESTOR TÉCNICO DE SISTEMA

A REE - Rede Elétrica da Espanha, detém a maioria da rede de transporte da Espanha. A REE é responsável pela gestão técnica do sistema elétrico espanhol no que se refere ao desenvolvimento da rede de transporte de alta tensão, por forma a garantir o fornecimento de eletricidade, e à correta coordenação entre o sistema de produção e de transporte, assim como pela gestão dos fluxos de eletricidade com o exterior. O operador do sistema exerce as suas funções junto ao operador de mercado.

1.2.9 - COMERCIALIZAÇÃO LIVRE

Esta atividade consiste na aquisição de eletricidade através da pool ou de contratos bilaterais e sua revenda a consumidores qualificados ou outros agentes do sistema, negociando livremente com os seus clientes as condições da venda de eletricidade. A comercializadora tem acesso às redes de transporte e distribuição de eletricidade mediante o pagamento de uma tarifa de acesso, a qual é estabelecida anualmente.

1.2.10 – TRANSPORTE

A rede de transporte de eletricidade é constituída por linhas, parques, transformadores e outros elementos elétricos com uma tensão superior a 220 kV, assim como outras instalações, independentemente da tensão, devem cumprir as funções de transporte ou de interconexão internacional e extra-peninsular.

1.2.11 – CONSUMIDOR QUALIFICADO

Desde Janeiro de 2003, todos os consumidores do mercado de eletricidade espanhol são livres para escolher o seu comercializador no mercado liberalizado. As condições do contrato de fornecimento de eletricidade são estabelecidas livremente entre as partes (EDP – Energia de Portugal, 2006).

1.3 – OTIMIZAÇÃO

O processo de otimização é uma técnica que aparece como uma necessidade de melhorar o estado de operação de um sistema que está operando (otimização da operação) ou de encontrar a melhor forma de operação de um sistema que se pretende construir (otimização do planeamento da expansão).

Geralmente um problema que envolve custo pode ser representado por um modelo matemático e pode-se usar a técnica de otimização para resolver esse modelo.

Estes problemas referem-se à distribuição eficiente de recursos limitados entre atividades competitivas, com a finalidade de atender a um determinado objetivo, por exemplo, maximização de lucros ou minimização de custos. Em se tratando de programação, esse objetivo será expresso por uma função, à qual dá-se o nome de função objetivo.

É necessário dizer quais as atividades que consomem cada recurso, e em que proporção é feito esse consumo. Essas informações serão expressas por equações ou inequações,

uma para cada recurso. Ao conjunto dessas equações ou inequações dá-se o nome de restrições do modelo.

Geralmente existem inúmeras maneiras de distribuir os escassos recursos entre as diversas atividades, bastando para isso que essas distribuições sejam coerentes com as equações de consumo de cada recurso, ou seja, que elas satisfaçam as restrições do problema. Entretanto, deseja-se achar a distribuição que satisfaça as restrições do problema, e que alcance o objetivo desejado, isto é, que maximize o lucro ou minimize o custo. A essa solução dá-se o nome de solução ótima.

Uma vez obtido o modelo, constituído pela função objetivo e pelas restrições, a programação se incumbe de achar a sua solução ótima.

Em álgebra linear básica resolve-se um sistema algébrico linear com o método de eliminação de Gauss. Nesse caso, geralmente, tem-se n equações e n incógnitas e a solução esperada é um único ponto.

Em análise numérica resolvem-se problemas não lineares usando método de Newton - iterativo. Neste caso, mesmo que o sistema se encontre formado por n equações e n incógnitas, o sistema pode apresentar soluções múltiplas, podendo ocorrer também problemas de convergência.

Em problemas onde o número de variáveis é maior que o número de equações (apresentando infinitas soluções) pode-se encontrar a solução de melhor qualidade. Nesse contexto aparece o problema de otimização de modelos lineares, chamado de problema de programação linear (PL).

A forma geral de um problema de PL é:

$$\text{Min } f(x) = c x$$

s.a

$$A x = b$$

$$x \geq 0$$

São problemas de otimização nos quais a função objetivo e as restrições são todas lineares.

Geometricamente, as restrições lineares definem um poliedro convexo, que é chamado de conjunto dos pontos viáveis. Uma vez que a função objetivo é também linear, toda solução ótima local é automaticamente uma solução ótima global. O fato da função objetivo ser linear também implica que uma solução ótima pode ocorrer apenas em um ponto da fronteira do conjunto de pontos viáveis.

Problemas de PL podem ser resolvidos usando os seguintes métodos:

- Gráfico;
- Simplex;
- Pontos Interiores.

Em problemas lineares inteiro misto, a função objetivo é linear assim como as restrições, entretanto, algumas (ou todas) variáveis são inteiras.

Nesse caso a complexidade para resolver o problema cresce de maneira proibitiva (geralmente aparece o fenômeno da explosão combinatória que significa que a região factível ou o espaço de busca cresce de forma exponencial).

Existem vários métodos para resolver problemas desse tipo:

- Planos de Cortes;
- Branch and Bound;
- Decomposição Matemática, etc.

Problemas de programação não linear (PNL) aparecem quando a função objetivo e/ou as restrições são não lineares. Na literatura existem vários métodos para resolvê-los (Newton, Lagrange, Gradiente Reduzido, etc), pois geralmente depende do tipo de problema que se pretende solucionar.

Da mesma forma, em problemas não lineares inteiro misto a função objetivo é linear ou não linear, assim como as restrições, entretanto, algumas (ou todas) variáveis são inteiras.

Na maioria das vezes os problemas da vida real podem ser representados através de um modelo matemático usando os seguintes passos:

- Escolher adequadamente as variáveis de decisão do problema, pois a cada variável de decisão está associada uma atividade;
- Planejar a função objetivo e todas as restrições do problema;
- Resolver o problema matemático planejado (LAZARO, ZULUAGA, RENDÓN, 2003).

CAPÍTULO 2

PLANTAS FORRAGEIRAS E FUNCIONAMENTO DA DESIDRATADORA

Neste capítulo apresentam-se algumas características das plantas forrageiras, os principais grupos dessa espécie e como ocorre a secagem para se obter o feno. Mostra-se também o funcionamento da fábrica desidratadora de forragens localizada na Espanha, que será analisada neste trabalho.

2.1 – FORRAGEM

A descoberta da agricultura e o seu início constituem um dos fatos mais marcantes da história da humanidade pelo seu significado no desenvolvimento da sociedade humana. Muitas explicações sobre os motivos que levaram o homem a iniciar a agricultura têm sido apresentadas. Entre as suas mais prováveis causas, pode-se citar a domesticação de animais e a possibilidade de "fixar residência". Estima-se que a agricultura tenha sido iniciada a 10.000 anos atrás, e entre as primeiras espécies cultivadas podem ser relacionadas algumas forrageiras. Existem registros de que a alfafa era cultivada há mais de 3.300 anos.

As plantas forrageiras ocupam a maior parte das áreas destinadas à exploração agrícola. Porém elas não têm recebido a merecida importância, sendo, muitas vezes, consideradas como sub-culturas, implantadas em áreas marginais de menor fertilidade. Isto tem ocorrido por falta de uma profunda avaliação do papel desempenhado por estas espécies na produção agropecuária e no equilíbrio ambiental. A maior parte dos

consumidores urbanos não conseguem perceber a importância das forrageiras na sustentação da produção de alimentos e artigos de consumo diário, como leite, carne, lã, couro e outros produtos considerados importantes para a sociedade em geral. Deve-se considerar também que a área verde coberta com forrageiras contribui significativamente para a produção de oxigênio e para a proteção dos ambientes naturais contra a erosão (GEN - Núcleo de Estudos em Genética, 2002).

2.2 – PRINCIPAIS GRUPOS DE PLANTAS FORRAGEIRAS

Pode-se considerar como forragens plantas inteiras ou partes destas plantas que servem de alimento aos animais domésticos e silvestres. As forragens são as partes comestíveis das plantas, utilizadas como alimento pelos animais em pastejo ou, ainda, colhidas para servir de forro para o animal.

Existem diferentes tipos de forragens, podendo ser citados como exemplos folhas e caules das plantas herbáceas, raízes e tubérculos, cascas de sementes, folhas, brotos e cascas de arbustos, árvores e cactos, restos e rebrota de cultura, frutos e sementes.

Embora vários tipos de plantas possam apresentar potencial forrageiro, as principais espécies são encontradas dentro de duas famílias: Gramineae e Leguminosae.

Há atualmente cerca de 10.000 espécies de plantas conhecidas, sendo que as gramíneas, orquídeas e compostas, possuem famílias mais numerosas. A família Gramineae ou Poaceae representa o maior e mais conhecido grupo de plantas forrageiras com 75% das espécies.

As gramíneas são plantas monocotiledôneas que, normalmente, apresentam como características básicas porte herbáceo, ausência de tecido lenhoso, capacidade de produção de sementes, presença de nós nos caules e folhas com bainhas. Entre as gramíneas destacam-se espécies de porte elevado como o bambu e reduzido como as gramas ornamentais, importantes produtoras de grãos como milho, trigo e arroz e alimentos como a cana de açúcar, forragem para animais como *Brachiaria*, *Panicum* colonião, e também há aquelas utilizadas como em materiais de construção, remédios e outros.

Podem ser encontradas espécies de gramíneas adaptadas às mais diferentes condições de ambientes com variação de temperatura, precipitação e altitude. Em razão desta elevada capacidade de adaptação, tem sido possível introduzir muitas espécies de

gramíneas em novas áreas de cultivo, muitas vezes, diferentes do habitat natural da espécie. A maioria das gramíneas forrageiras cultivadas é de origem africana, tendo como exemplo espécies de *Brachiaria*, *Panicum*, *Pennisetum*, *Setaria*, *Cynodon*, *Cenchrus*.

Pesquisas comprovam que aproximadamente dois terços da massa vegetal que recobre a superfície terrestre é composta por gramíneas de diversos tipos. As gramíneas são classificadas em duas categorias: espécies temperadas e tropicais.

Observou-se que as espécies forrageiras temperadas apresentam melhor qualidade, definida em termos de digestibilidade, consumo e teor de proteína. A degradação ruminal dessas gramíneas ocorre mais rapidamente que as do tipo tropical, visto que as mesmas apresentam parede celular mais fina, ou seja, contém menor teor de compostos indigeríveis, como a lignina. Entretanto, as gramíneas tropicais apresentam maior eficiência fotossintética, sendo mais produtivas em termos de matéria seca. A qualidade (teor de proteína, consumo e digestibilidade) das gramíneas tropicais, realmente é considerada inferior a das gramíneas temperadas (GEN, 2002).

2.3 – DESIDRATAÇÃO DA FORRAGEM

O processo de desidratação parcial da planta forrageira chama-se fenação. O processo de desidratação retira água da planta, fazendo com que o produto se conserve por um longo período de tempo, mantendo o seu valor nutritivo. A forragem que sofreu processo de desidratação até atingir o teor de umidade que permite se manter estável nas condições ambientais é denominada feno. A perda de água, mesmo em condições ambientais constantes não é uniforme. O período de secagem pode ser dividido em duas ou três fases, as quais diferem na duração, na taxa de perda de água e na resistência à desidratação (MACDONALD e CLARK, 1987).

Na primeira fase, logo após o corte, há rápida desidratação da forragem, reduzindo a umidade de 80 – 85% para teores ao redor de 65 – 60%. Nessa fase, a principal perda de água é por transpiração. Na segunda fase, ocorre o fechamento dos estômatos, e a perda de água ocorre por difusão celular através da epiderme e cutícula. Nessa fase, a umidade é reduzida de teores próximos a 60% para teores ao redor de 30%. Já na terceira fase, a perda de umidade se dá através de plasmólise, onde ocorre redução na umidade de 30% para 10 a 15% (HARRIS e TULLBERG, 1980).

O ponto de feno é definido quando a umidade encontra-se entre 12 e 18% e o material alcança estabilidade no processo de desidratação. Na prática vários métodos são utilizados para sua detecção, desde o uso de higrômetros específicos até teste rápido de sensibilidade.

O feno que não desidratou o suficiente tem o risco de intoxicar os animais que o consomem, devido à ingestão de fungos patogênicos, tais como: *aspergillus glaucus*, *aspergillus flavus*, *aspergillus fumigatus*, *actinomicetos* e *tomactinomicetos*, que causam transtornos digestivos e aborto nos animais.

O ponto de feno ideal é revelado quando se procede a torção e o material não se rompe nem acusa umidade no ponto de pressão. Atingido o ponto de feno, a etapa seguinte é armazenar o feno nas formas de pacotes ou de grãos (MACDONALD e CLARK, 1987).

2.4 – DESIDRATADORA DE FORRAGENS

Analisa-se neste trabalho a indústria desidratadora (secadora) de forragem Virgen de la Corona, localizada na Espanha, que consta de três processos, para que se obtenham pacotes (fardos) ou grãos. O primeiro passo é o processo de secagem. Estando seca a forragem, os dois passos seguintes serão totalmente independentes e não poderão ocorrer simultaneamente. Estes passos consistem nos processos de empacotar e granular, que serão descritos durante o texto.

Para dar início ao processo de secagem na fábrica desidratadora a forragem úmida é transportada por meio de uma esteira. Esta esteira consiste em um elevador com um formato cilíndrico que eleva a forragem. Dela, a forragem passa a um transportador de correias horizontais que leva o produto para a bobina de entrada.

Esta bobina de entrada consiste em um cilindro metálico que por um lado está unido à câmara de combustão e por outro ao tambor de secagem. Neste cilindro é implantado uma calha metálica para que o produto entre, e o transportador horizontal de correias seja descarregado. Por meio do espaço deixado pela calha e através das paredes do cilindro, penetra o ar seco que vem da câmara de combustão.

A forragem úmida entra na bobina e passa ao tambor de secagem, que consiste em um tambor metálico rotativo. Este tambor metálico é composto de três corpos cilíndricos unidos entre si através de duas faixas rolantes. Estas faixas estão apoiadas sobre dois rodilhos dianteiros e traseiros que suportam o peso do tambor e transmitem o movimento do motor ao tambor.

No interior do tambor ocorre a troca de calor do produto com o ar quente da secagem. Esta troca leva à evaporação da água que está na forragem. O corpo do tambor é isolado de modo térmico com lã de vidro, envolto em aço inoxidável polido. Dentro dele existe um conjunto de paletas girantes e há também dois sistemas de reservatório.

A produção de ar quente é realizada mediante o queimador de óleo que gera a combustão confinada na câmara. Um primeiro aquecimento proporciona aos gases misturados com o ar um excesso de combustão. O ar do exterior passa pelas paredes da câmara produzindo um resfriamento no interior dela. Esta resfriamento gera um aquecimento da corrente de ar exterior que se une a primeira ao final da câmara.

A sonda pirométrica permite realizar um controle sobre a quantidade de combustível para manter a segurança do equipamento. O ventilador centrífugo situado no final do circuito de transporte pneumático garante a segurança no momento em que determinada quantidade de ar está sendo aquecido.

Na saída do tambor, o produto é expirado por um ventilador para o ciclone decantador, que está unido ao tambor por um condutor ou tubulação. O ciclone tem uma saída de ar superior, conectado ao ventilador.

Na base do ciclone situa-se uma comporta, acionada por um motor. Com ela é possível manter o circuito tambor - ventilador, fazendo com que o produto saia seco e quente. Uma cinta transportadora leva a forragem até o refrigerador.

Pode-se observar no esquema a seguir que a saída da forragem se realiza através do ciclone, e este por sua vez envia a forragem a uma transportadora que girará para a esquerda se for necessário produzir fardos ou girará para a direita se for necessário produzir grãos.

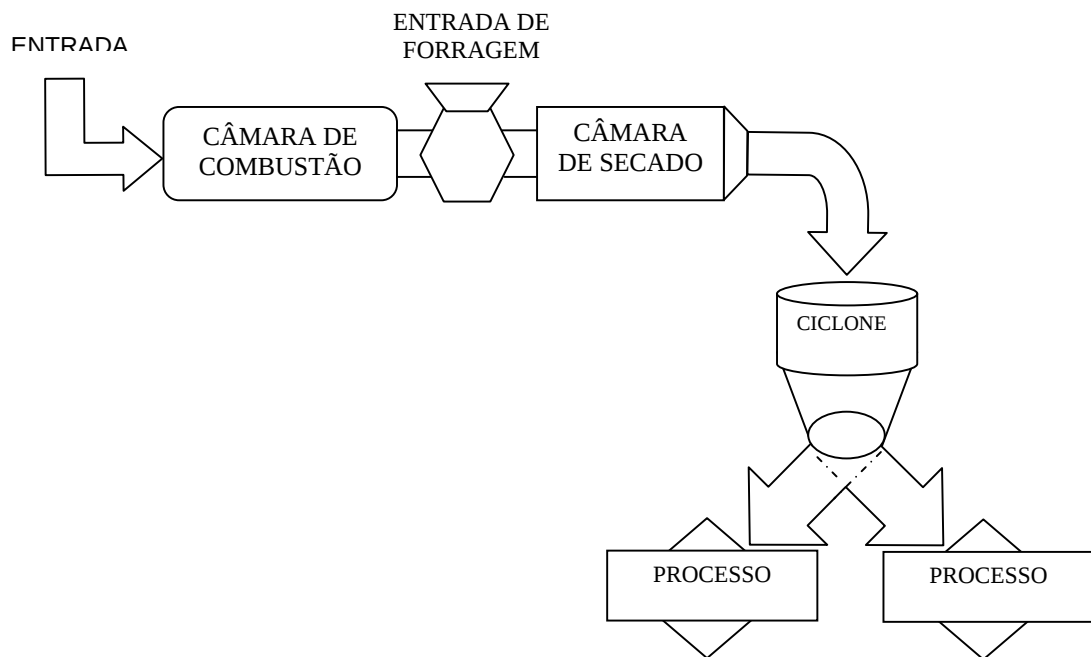


Figura 2.1 – Esquema de funcionamento da fábrica.



Figura 2.2 - Foto do ciclone.

2.5 - PROCESSO DE EMPACOTAR

O processo de empacotar é iniciado quando a forragem cai sobre a transportadora e o eixo gira para a esquerda. A forragem sofre um processo de esfriamento em seu caminho para a prensa empacotadora, onde se produzem os fardos. Na empacotadora a forragem recebe a forma definitiva de fardo e estes serão levados por uma máquina transportadora para a sua posterior recolhida.



Figura 2.3 - Foto da prensa e empacotadora.

2.6 – PROCESSO DE GRANULAR

Com a foto da Figura 2.4 é possível observar que o feno chega ao moinho granulador para ser moído e em seguida vai para o silo onde será armazenado. Este armazenamento é um sistema de segurança, pois se uma granuladora falhar, a outra não poderá absorver toda a forragem e assim haverá um colapso na produção da fábrica. Essa forragem é armazenada no silo, sendo que, quando o silo está cheio a fábrica pára a produção.

O produto sai do silo por dois condutores independentes que o leva até as granuladoras. Uma vez produzidos os grãos, este cai em uma transportadora comum às duas granuladoras, que os leva à um esfriador e em seguida para o depósito.

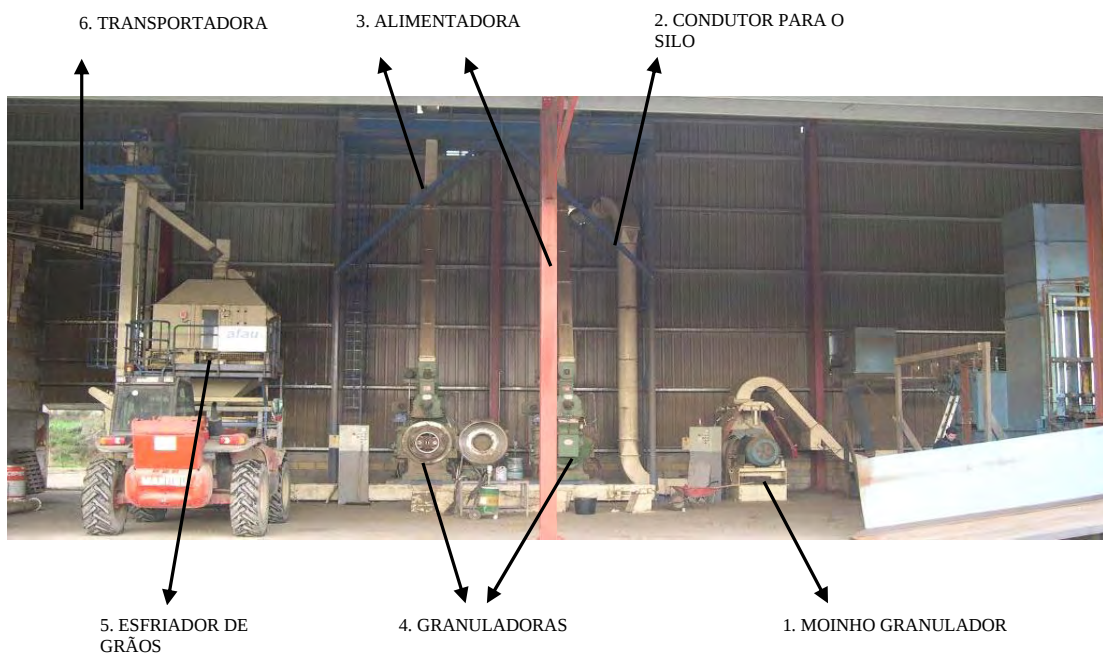


Figura 2.4 - Foto das máquinas do processo.

2.7 - POTÊNCIA INSTALADA

Realizou-se uma análise da potência instalada nessa fábrica, e constatou-se que ela é de 1021,66 kW. Separou-se então, esta potência pelos seguintes processos realizados:

- Processo de secagem;
- Processo de empacotar;
- Processo de granular.

1 - PROCESSO DE SECAGEM

O processo de secagem possui uma potência total instalada de 259,48 kW. Isto não significa que esta potência seja constante. Para que este valor seja alcançado todos os motores devem estar em funcionamento com 100% da carga durante o processo e isso raramente ocorrerá. A seguir apresenta-se uma tabela com os equipamentos que compõem o processo de secagem e seus respectivos gastos energéticos.

Tabela 2.1 - Máquinas do processo de secagem.

MÁQUINA	kW
QUEIMADOR	14,99
ACIONADOR DA TRANSPORTADORA	4,1
TAMBOR	22,35
COMPORTA SITUADA ABAIXO DO CICLONE	14,9
VENTILADOR	163,9
CINTA TRANSPORTADORA	1,49
ESFRIADOR - REFRIGERADOR	2,98
VENTILADOR GERADOR DE AR FRIO	34,77
TOTAL (kW)	259,48

2 - PROCESSO DE EMPACOTAR

Este possui uma potência total instalada de 56,34 kW, mas também não é uma potência constante.

Tabela 2.2 - Máquinas do processo de empacotar.

MÁQUINA	kW
MECANIZADOR DA CINTA EMPACOTADORA	4,1
PRENSA EMPACOTADORA	37,25
MÁQUINA TRANSPORTADORA DE FARDOS	14,99
TOTAL (kW)	56,34

3 - PROCESSO DE GRANULAR

A potência instalada para o processo de granular é de 705,92 kW, esta é a maior potência da fábrica e é o processo que mais consome energia para ser realizado. É evidente que este gasto não é constante e que raramente este pico ocorrerá.

Tabela 2.3 - Máquinas do processo de granular.

MÁQUINA	kW
MOTOR DO MOINHO	253,3
ASPIRADOR DO MOINHO	55,88
COMPORTA DAS PALETAS ROTATIVAS DO CICLONE	4,1
COMPORTA DAS PALETAS ROTATIVAS DO FILTRO	0,37
ROSCA ABAIXO DO CICLONE	4,1
ELEVADOR	4,1
ALIMENTADOR DA GRANULADORA	2,98
ROSCA DUPLA	2,98
GRANULADORA 1	173,59
GRANULADORA 2	173,59
COLHEDORA DE GRÃOS	2,24
ELEVADOR DE GRÃOS	2,24
DEPURADOR ESFRIADOR DE GRÃOS	1,49
ASPIRADOR DO ESFRIADOR DE GRÃOS	22,35
COMPORTA ABAIXO DO ESFRIADOR DE GRÃOS	0,37
TRANSPORTADORA QUE LEVA OS GRÃOS PARA O ARMAZÉM	2,24
TOTAL (kW)	705,92

O processo de granular possui um gasto de energia muito elevado. Se fosse possível, a indústria não o realizaria, pois terá que produzir muito pouco, com um custo extremamente mais elevado. Mas infelizmente esse processo tem que ser executado, é uma necessidade de mercado. A solução é tentar produzir somente o necessário exigido pelo mercado, em períodos de tempo em que o custo da energia elétrica seja mais barato.

A secagem da forragem sempre será realizada com um dos processos, assim o gasto energético de pico total é dado pela tabela a seguir:

Tabela 2.4 - Gasto total de energia.

SECAR	EMPACOTAR	GRANULAR	kW
259,48	56,34	-----	315,82
259,48	-----	705,92	965,4

CAPÍTULO 3

REGRESSÃO LINEAR E EQUAÇÕES DOS PROCESSOS DA FÁBRICA

Os dados que serão utilizados neste trabalho foram extraídos diariamente, no período de 2002, 2003 e 2004, da fábrica desidratadora Virgen de la Corona, localizada na Espanha. Neles constam, a produção em Ton (toneladas), a quantidade de energia gasta para realizar esta produção em kWh (kilowatts hora) e a quantidade de horas. Com esses dados, o comportamento da fábrica deverá ser ajustado usando equações lineares, uma para o processo de granular e outra para o processo de empacotar.

Inicialmente, usando os dados fornecidos (tabelas A1 e A2 do apêndice) para ajustar o comportamento da fábrica, tentou-se usar regressão linear, mais especificamente, regressão linear no plano, para a obtenção de equações que descrevam os processos de empacotar e granular. Para esse fim, foram divididos os dados da produção e os dados do consumo de energia pelas respectivas horas gastas, Ton/h e kWh/h (tabelas A3 e A4 do apêndice). Porém, a quantidade de horas utilizadas para realizar um determinado processo não é proporcional à produção, ou seja, em determinados momentos produziu-se mais toneladas em menos tempo ou menos toneladas e gastou-se muito mais tempo. Analisando a tabela A1 do apêndice notam-se vários exemplos, em um deles pode ser observado uma produção de 205,43Ton em um período de 24,08h (linha 365), e uma produção de 232,0547Ton em um período de 23,70h (linha 331). Logo, estes dados não possuem alto grau de linearidade, não sendo razoável, portanto, o uso dos dados obtidos a partir da divisão da quantidade de produção pelas horas gastas; ou seja, não é razoável o uso dos dados obtidos a partir da junção dos dados da produção pelo tempo gasto, como pode-se constatar na seção 3.4 .

Por esse motivo então, são propostas neste trabalho equações para descrever os processos de empacotar e granular utilizando os três dados separadamente, empregando o método de regressão linear múltipla, mais especificamente: regressão linear no espaço, para a obtenção das equações que descrevem os respectivos processos, o que é feito na seção 3.7.

3.1 – ANÁLISE DE REGRESSÃO

O objetivo principal da análise de regressão é prever o valor de uma variável (a variável dependente), a partir de um dado que seja conhecido, o valor de uma variável associada (a variável independente). A equação da regressão é a fórmula algébrica pela qual se determina o valor previsto da variável dependente.

Na prática, constata-se frequentemente a existência de uma relação entre duas (ou mais) variáveis e se deseja expressar tal relação sob forma matemática, estabelecendo-se uma equação entre as variáveis.

A expressão “análise de regressão simples” (no plano) indica que a predição da variável dependente é feita em função de uma variável independente, enquanto a “análise de regressão múltipla” diz respeito à predição da variável dependente com base em duas ou mais variáveis independentes.

As hipóteses gerais subjacentes ao modelo de regressão são: a variável dependente é uma variável aleatória; as variáveis independente e dependente estão associadas linearmente; e as variáveis das distribuições condicionais da variável dependente, dados os diferentes valores da variável independente, são todas iguais (homoscedasticidade). A primeira hipótese indica que, muito embora os valores da variável independente possam ser fixados, os valores da variável dependente devem ser obtidos através de um processo de amostragem.

Um diagrama de dispersão é um gráfico, no plano, no qual cada ponto desenhado representa um par observado de valores para as variáveis dependente e independente. Se o diagrama de dispersão indica uma relação linear, então ajustam-se os dados a uma reta que seja de melhor ajuste, denominada reta de regressão.

Uma reta de regressão com uma inclinação positiva indica a existência de uma relação direta entre as variáveis, quando uma cresce a outra cresce também, ao passo que, uma inclinação negativa indica que há uma relação inversa entre as variáveis, e uma inclinação nula indica que as variáveis não estão relacionadas. Além disso, a extensão da dispersão dos pontos com relação à reta de regressão indica o grau de relacionamento entre as variáveis.

Por meio do coeficiente de correlação linear, pode-se estudar o grau de associação que existe entre duas variáveis, procurando determinar, quão bem uma equação linear ou de outra espécie descreve ou explica uma relação entre as variáveis. A correlação linear, portanto, procura prever o grau de dependência entre duas variáveis, onde cada uma aparece com valores $(x_1, \dots, x_n)$ e $(y_1, \dots, y_n)$ observados, entre os quais é ajustado uma reta da forma $y = a + bx$ ou $x = a' + b'y$.

Um diagrama de dispersão mostra a localização dos pontos em um sistema de coordenadas cartesianas. Se os pontos deste diagrama estiverem alinhados, a correlação é denominada correlação linear. Se os pontos estiverem na forma de uma curva não linear, a correlação é denominada não linear, e uma equação não linear será apropriada para a regressão ou estimativa dos parâmetros da curva.

Se todos os valores das variáveis satisfazem exatamente uma equação, diz-se que elas estão perfeitamente correlacionadas ou que há correlação perfeita entre elas. Quando está em jogo somente uma variável se trata de correlação e regressão simples, e quando estão em jogo duas ou mais variáveis se trata de correlação e regressão múltipla (KAZMIER, 1982).

3.2 – O MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PARA AJUSTAR UMA RETA DE REGRESSÃO

Pode-se estabelecer uma regressão linear simples, cujo modelo estatístico é:

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + \varepsilon_i \quad (3.1)$$

Sendo y_i a variável dependente, x_i a variável independente, a_0 e a_1 parâmetros e ε_i o erro aleatório ou desvio de regressão (SOUZA, 2005).

Dados n pares de valores de variáveis dependentes x_i e y_i ; com $i = 1, 2, \dots, n$, e admitindo-se que y é uma função linear de x , tem-se:

$$y = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x \quad (3.2)$$

A equação de regressão que melhor se ajusta a um conjunto de pares de dados (x, y) , é aquela para a qual é mínima a soma dos quadrados dos desvios entre os valores observados e estimados da variável dependente para os dados amostrais. Os valores de a_0 e de a_1 , da equação de regressão linear, podem ser estimados pelo critério dos mínimos quadrados, utilizando as equações (denominadas equações normais):

$$\hat{a}_0 n + \hat{a}_1 \sum X = \sum Y \quad (3.3)$$

$$\hat{a}_0 \sum X + \hat{a}_1 \sum X^2 = \sum XY \quad (3.4)$$

obtendo

$$\hat{a}_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3.5)$$

$$\hat{a}_1 = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3.6)$$

sendo:

- n = número de pares ordenados (x_i, y_i)
- $\sum X = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$ = soma dos x_i
- $\sum Y = y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n$ = soma dos y_i
- $\sum XY = x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 + \dots + x_n y_n$ = soma dos produtos $x_i y_i$
- $\sum X^2 = (x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2 + \dots + (x_n)^2$ = soma dos quadrados x_i^2

Uma vez que tenha sido obtida a estimativa da equação de regressão, pode-se utilizá-la para estimar o valor da variável dependente, dado o valor da variável independente. Contudo, tal estimação deve ser feita apenas dentro do intervalo de variação dos valores da variável independente originalmente amostrado, já que não existe base estatística para supor que a linha de regressão é apropriada fora desse limite (KAZMIER, 1982).

Os números $\hat{a}_0$ e $\hat{a}_1$ calculados como em (3.5) e (3.6) devem ser substituídos na equação (3.2)

3.3 – COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO SIMPLES

O chamado coeficiente de determinação linear (r^2) é o quadrado do coeficiente de correlação de Pearson. Para a equação da reta de regressão, em estatística descritiva, o coeficiente de correlação de Pearson, também chamado de "coeficiente de correlação" ou simplesmente de " r de Pearson", que mede o grau da correlação entre as duas variáveis e a direção dessa correlação.

Este coeficiente, normalmente representado pela letra " r " assume apenas valores entre -1 e 1.

- $r = 1$ Significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis.
- $r = -1$ Significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis.

- $r = 0$ Significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra, no entanto, pode existir uma dependência que seja "não linear".

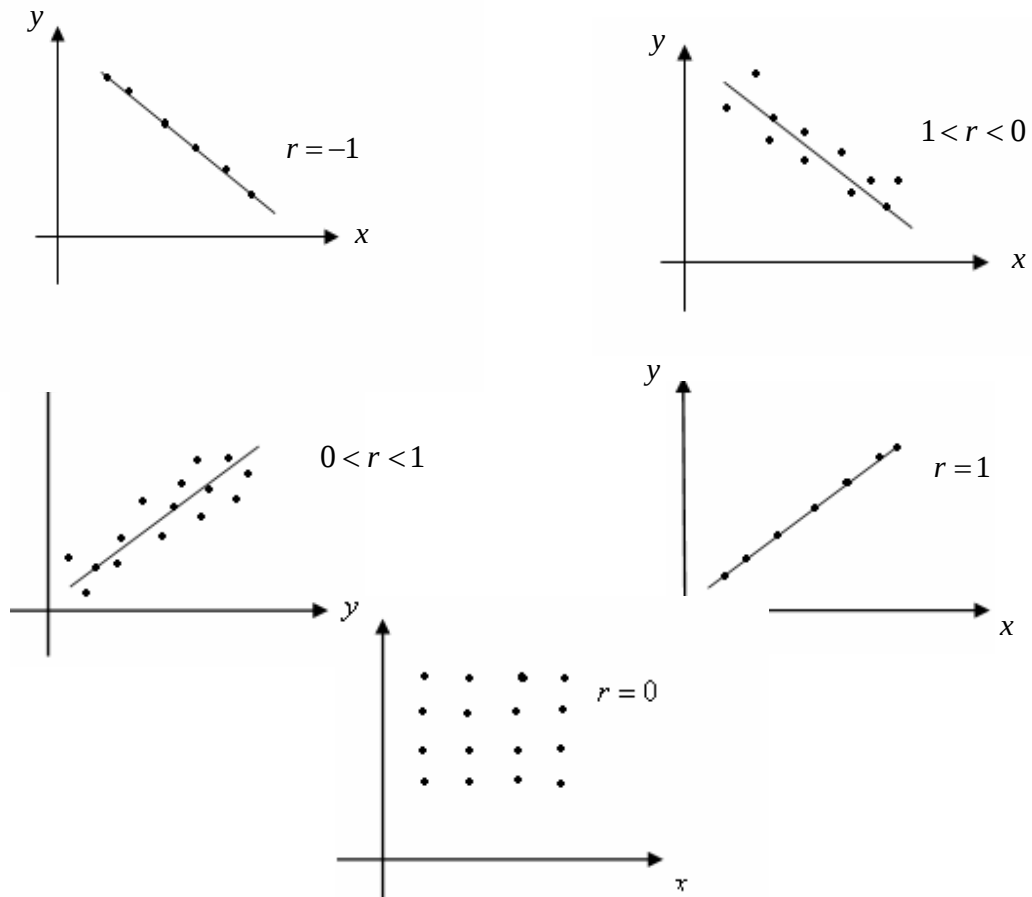


Figura 3.1 – Gráficos das correlações.

Ao se analisar a reta de regressão observa-se que os pontos (x_i, y_i) , $1 \leq i \leq n$, estão distribuídos acima e abaixo da mesma. Relaciona-se cada ponto com o seu valor estimado (reta de regressão) e com o valor médio de Y (reta paralela ao eixo X representada por $\bar{y}$). O valor médio de Y é determinado observando o intervalo em que os pontos da amostra se encontram no eixo Y (o maior e o menor valor de y), calcula-se então a média desse intervalo encontrado:

$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$. A diferença entre o valor de Y e o valor médio de Y é o desvio total do ponto em relação à sua média: $y_i - \bar{y}$.

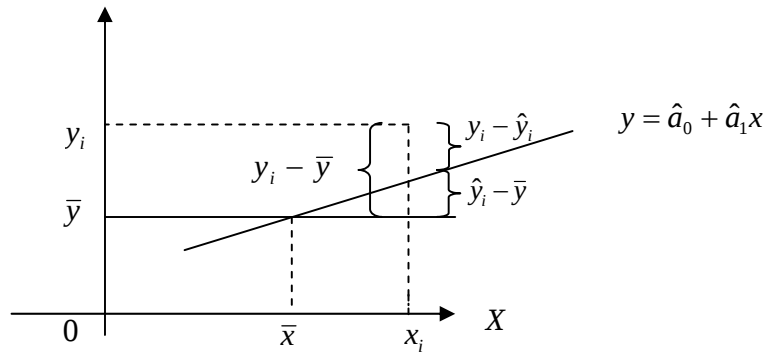


Figura 3.2 – Representação da decomposição da soma de quadrados

O desvio total $y_i - \bar{y}$ pode ser considerado como a soma

$$y_i - \bar{y} = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (3.7)$$

de dois componentes:

1. os desvios dos valores ajustados (valores da regressão) em torno da média: $(\hat{y}_i - \bar{y})$;
2. o desvio de y_i em torno da reta de regressão: $y_i - \hat{y}_i$.

Usando (3.7), pode-se mostrar que:

$$\sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.8)$$

ou, na forma abreviada,

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 = \sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 + \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (3.9)$$

A quantidade à esquerda de (3.9) é chamada variação total:

$$\sum (Y - \bar{Y})^2 \quad (3.10)$$

O primeiro somatório à direita de (3.9) é a variação explicada pela representação:

$$\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2 \quad (3.11)$$

Já o segundo somatório, é a variação não explicada:

$$\sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (3.12)$$

O quociente da variação explicada pela variação total é denominado coeficiente de determinação, denotado por r^2 . Se a variação explicada for nula, isto é, se a variação total for toda não explicada, esse quociente será igual a zero. Se a variação não explicada for nula, isto é se a variação total for toda explicada, o quociente será igual a um. Nos outros casos, o quociente terá valor compreendido entre zero e um ($0 \leq r^2 \leq 1$):

$$r^2 = \frac{\sum (\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum (Y - \bar{Y})^2} = \frac{\text{Variação Explicada}}{\text{Variação Total}} \quad (3.13)$$

Mas, considerando que o Coeficiente de Determinação Linear pode ser obtido pelo quadrado do coeficiente de correlação de Pearson, dado pela expressão:

$$r = \frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (3.14)$$

tem-se

$$r^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2 \quad (3.15)$$

O r^2 é uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra. É pouco comum haver uma correlação perfeita na prática, pois existem muitos fatores que determinam as relações entre variáveis na vida real. Um valor do coeficiente de determinação próximo de um, indica um ajuste muito bom para os dados (SPIEGEL, 1976).

3.4 – ANÁLISE DOS PROCESSOS DE EMPACOTAR E GRANULAR UTILIZANDO REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Aqui a idéia é usar os dados que se têm (tabelas A1 e A2): da produção em toneladas, da quantidade de energia gasta para essa produção e da quantidade de horas gastas, para ajustar o comportamento da fábrica nos processos de empacotar e de granular, usando regressão linear simples. Para tanto, serão usados os dados obtidos a partir da junção dos dados da produção e do consumo pelos respectivos tempos gastos (tabelas A3 e A4).

3.4.1 – ANÁLISE DO PROCESSO DE EMPACOTAR E REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Os dados utilizados para obter a equação do processo de empacotar foram retirados da tabela A3 que contém um conjunto de 409 pontos. Os dados da tabela A3 constam na tabela A1 com 420 pontos, porém os dados de produção (Ton) e de consumo (kWh) encontram-se divididos pelo tempo (h). Aplicando assim o processo de regressão linear simples, usando os dados da tabela A3 tem-se:

- $n = 409$
- $\sum X = 3581,476$
- $\sum Y = 39451$
- $\sum XY = 347337,4$
- $\sum X^2 = 32092,86$
- $\sum Y^2 = 3838427$

Sendo X o conjunto dos pontos referentes à produção (Ton/h) e Y o conjunto dos pontos referentes ao consumo (kWh/h).

Substituindo os valores na equação seguinte, tem-se:

$$\hat{a}_0 n + \hat{a}_1 \sum X = \sum Y$$

$$\hat{a}_0 \sum X + \hat{a}_1 \sum X^2 = \sum XY$$

$$\hat{a}_0 409 + \hat{a}_1 3581,476 = 39451$$

$$\hat{a}_0 3581,476 + \hat{a}_1 32092,86 = 347337,4$$

Resolvendo o sistema encontra-se $\hat{a}_0 = 73,97$ e $\hat{a}_1 = 2,56$. Substituindo estes valores na equação abaixo, tem-se:

$$y = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x$$

$$y = 73,96 + 2,56x$$

Logo, esta é a equação da reta de regressão correspondente ao processo de empacotar.

Calculando o valor do coeficiente de determinação tem-se:

$$r^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2$$

$$r^2 = \left(\frac{409 \cdot (347337,4) - 39451 \cdot (3581,476)}{\sqrt{[409 \cdot 32092,86 - (3581,476)^2] \cdot [409 \cdot (3838427) - (39451)^2]}} \right)^2$$

$$r^2 = 0,1458$$

Logo, este coeficiente de determinação não possui um bom valor, está muito distante de um, isso significa que os dados não estão bem explicados pela reta de regressão.

Esse fato sugere que para ajustar o comportamento da fábrica no processo de empacotar, não é recomendável usar os dados obtidos a partir da junção dos dados da produção pelo tempo gasto; ou seja, o uso de regressão linear no plano, para analisar o comportamento da fábrica relativo ao processo de empacotar, não é adequado.

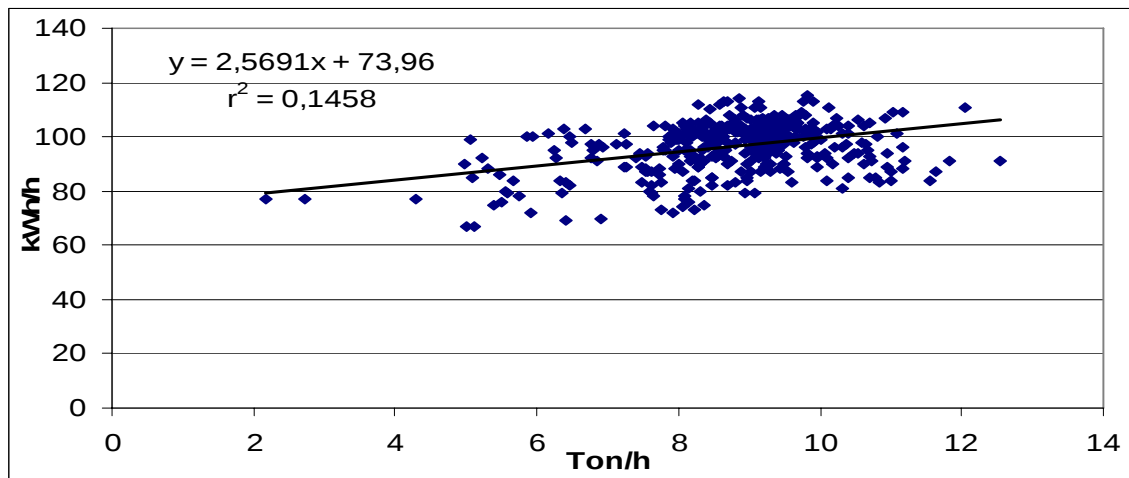


Figura 3.3 – Gráfico do processo de empacotar utilizando regressão linear simples.

3.4.2 – ANÁLISE DO PROCESSO DE GRANULAR E REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Os dados utilizados para obter as equações do processo de granular foram retirados da Tabela A4 que contém um conjunto de 331 pontos. Os dados da tabela A4 constam na tabela A2 com 357 pontos, porém os dados de produção (Ton) e de consumo (kWh) encontram-se divididos pelo tempo (h). Aplicando assim o processo de regressão linear simples tem-se:

- $n = 331$
- $\sum X = 2230,189$
- $\sum Y = 154150$
- $\sum XY = 1048367$
- $\sum X^2 = 15446,44$
- $\sum Y^2 = 1048367$

Sendo X o conjunto dos pontos referentes à produção (Ton/h) e Y o conjunto dos pontos referentes ao consumo (kWh/h).

Substituindo os valores na equação, tem-se:

$$\hat{a}_0 n + \hat{a}_1 \sum X = \sum Y$$

$$\hat{a}_0 \sum X + \hat{a}_1 \sum X^2 = \sum XY$$

$$\hat{a}_0 331 + \hat{a}_1 2230,189 = 154150$$

$$\hat{a}_0 2230,189 + \hat{a}_1 15446,44 = 1048367$$

Resolvendo o sistema encontra-se $\hat{a}_0 = 309,1$ e $\hat{a}_1 = 23,2$. Substituindo estes valores na equação abaixo, tem-se:

$$y = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x$$

$$y = 309,1 + 23,2x$$

Logo, esta é a equação da reta de regressão correspondente ao processo de empacotar.

Calculando o valor do coeficiente de determinação tem-se:

$$r^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2$$

$$r^2 = \left(\frac{331 \cdot (1048367) - 154150 \cdot (2230,189)}{\sqrt{[331 \cdot (15446,44) - (2230,189)^2] \cdot [331 \cdot (1048367) - (154150)^2]}} \right)^2$$

$$r^2 = 0,274.$$

Logo, este coeficiente de determinação não possui um bom valor, está muito distante de um, isso significa que os dados não estão bem explicados.

Da mesma forma, para ajustar o comportamento da fábrica no processo de granular não é recomendável usar os dados obtidos a partir da junção dos dados da produção pelo tempo gasto.

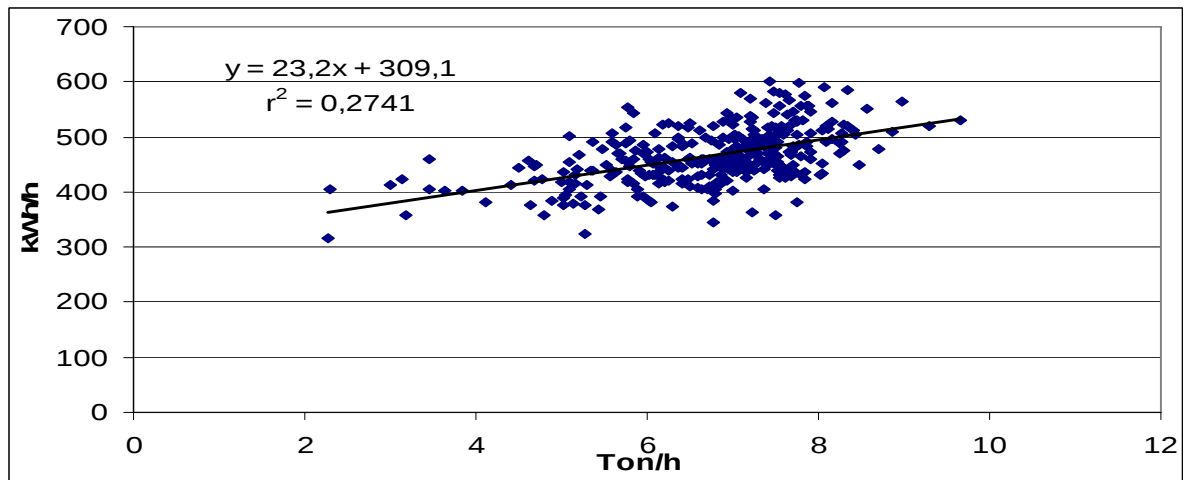


Figura 3.4 – Gráfico do processo de granular utilizando regressão linear simples.

Os dois casos (análises dos processos de empacotar e granular) considerados nessa seção motivam a introdução de “regressão linear múltipla”.

3.5 – REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA (NO ESPAÇO)

A regressão linear múltipla está associada a problemas que envolvem mais de duas variáveis. Por exemplo, em problemas com três variáveis x , y e z pode haver uma relação entre as três, sendo descrita pela expressão:

$$z = a_0 + a_1x + a_2y + \varepsilon_i \quad (3.16)$$

denominada equação linear das variáveis x , y e z .

Em um sistema tridimensional, essa equação representa um plano e os pontos amostrais reais (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , ..., (x_n, y_n, z_n) podem “dispersar-se” em posições não muito distantes desse plano, que pode ser denominado de ajustamento.

Mediante a extensão do método dos mínimos quadrados, pode-se falar de um plano de mínimo quadrado de ajustamento dos dados. Se z está sendo avaliado a partir de valores atribuídos a x e y , ele é denominado plano de regressão de z para x e y . As equações normais, correspondentes ao plano de mínimo quadrado, são dadas por:

$$\hat{a}_0 n + \hat{a}_1 \sum X + \hat{a}_2 \sum Y = \sum Z \quad (3.17)$$

$$\hat{a}_0 \sum X + \hat{a}_1 \sum X^2 + \hat{a}_2 \sum XY = \sum XZ \quad (3.18)$$

$$\hat{a}_0 \sum Y + \hat{a}_1 \sum XY + \hat{a}_2 \sum Y^2 = \sum YZ \quad (3.19)$$

que representam superfície de regressão.

Assim como há, em um diagrama de dispersão de duas dimensões, retas de regressão de mínimo quadrado que se ajusta a um conjunto de n pontos, também há, em um diagrama de dispersão tridimensional, planos de regressão de mínimo quadrado que se ajusta a um conjunto de n pontos.

Se o número de variáveis for maior que três, perder-se-á a intuição geométrica, pois, seria necessário considerar espaços de quatro ou mais dimensões. Assim, os problemas que envolvem a avaliação de uma variável a partir de duas ou mais variáveis são denominados de regressão linear múltipla (SPIEGEL, 1976).

3.6 – COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO MÚLTIPLO

Como no caso da reta de regressão, ao se analisar o plano de regressão tem-se que os pontos (x_i, y_i, z_i) , $1 \leq i \leq n$, estão distribuídos acima e abaixo deste plano. Relaciona-se cada ponto com o seu valor estimado (plano de regressão) e com o valor médio de Z (plano paralelo ao plano coordenado XY representado por $\bar{z}$). O valor médio de Z ($\bar{z}$) é determinado observando o intervalo em que os pontos da amostra se encontram no eixo Z (o maior e o menor valor de z), calcula-se então a média desse intervalo encontrado: $\bar{z} = \frac{\sum z_i}{n}$. A diferença entre o valor de Z e o valor médio de Z é o desvio total do ponto em relação a sua média: $z_i - \bar{z}$.

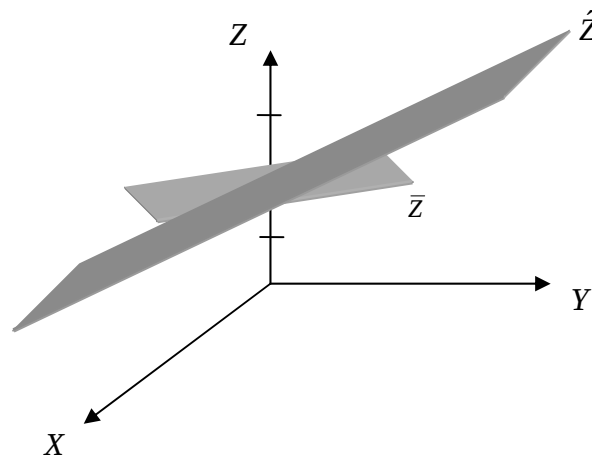


Figura 3.5 – Representação dos planos.

Como no caso de regressão linear simples, o desvio total $z_i - \bar{z}$ pode ser escrito como a soma

$$z_i - \bar{z} = (\hat{z}_i - \bar{z}) + (z_i - \hat{z}_i) \quad (3.20)$$

em termos do desvio de z_i em torno do plano de regressão $z_i - \hat{z}_i$ e dos valores ajustados em torno da média $\hat{z}_i - \bar{z}$.

A partir de (3.20) pode-se obter a expressão

$$\sum (z_i - \bar{z})^2 = \sum (\hat{z}_i - \bar{z})^2 + \sum (z_i - \hat{z}_i)^2 \quad (3.21)$$

ou, na forma abreviada

$$\sum (Z - \bar{Z})^2 = \sum (\hat{Z} - \bar{Z})^2 + \sum (Z - \hat{Z})^2 \quad (3.22)$$

o que significa que

Variação Total = Variação Explicada + Variação Não Explicada.

O quociente da variação explicada pela variação total é denominado coeficiente de determinação, denotado por r^2 . Se a variação explicada for nula, isto é, se a variação total for toda não explicada, esse quociente será igual a zero. Se a variação não explicada for nula, isto é se a variação total for toda explicada, o quociente será igual a um. Nos outros casos, o quociente terá valor compreendido entre zero e um ($0 \leq r^2 \leq 1$):

$$r^2 = \frac{\sum (\hat{Z} - \bar{Z})^2}{\sum (Z - \bar{Z})^2} = \frac{\text{Variação Explicada}}{\text{Variação Total}} \quad (3.23)$$

O coeficiente de determinação múltiplo pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$r_{XYZ}^2 = \frac{r_{XY}^2 + r_{XZ}^2 - 2r_{XY}r_{XZ}r_{YZ}}{1 - r_{YZ}^2} \quad (3.24)$$

sendo

$$r_{XY}^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2 \quad (3.25)$$

$$r_{XZ}^2 = \left(\frac{n \sum XZ - \sum Z \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Z^2 - (\sum Z)^2]}} \right)^2 \quad (3.26)$$

$$r_{YZ}^2 = \left(\frac{n \sum YZ - \sum Z \cdot \sum Y}{\sqrt{[n \sum Y^2 - (\sum Y)^2] \cdot [n \sum Z^2 - (\sum Z)^2]}} \right)^2 \quad (3.27)$$

Desta forma é possível obter o coeficiente de determinação múltiplo (SPIEGEL, 1967).

3.7 - ANÁLISE DOS PROCESSOS DE EMPACOTAR E GRANULAR UTILIZANDO REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Aqui serão usados os dados que se têm (tabelas A1 e A2): da produção (representado pela variável x), do consumo (representado pela variável z) e do tempo gasto (representado pela variável y), para ajustar o comportamento da fábrica nos processos de empacotar e de granular, usando regressão linear múltipla (no espaço). Para tanto, serão usados os dados que se têm separadamente.

3.7.1 - ANÁLISE DO PROCESSO DE EMPACOTAR E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Os dados utilizados para obter a equação do processo de empacotar foram retirados da tabela A1, que contém um conjunto de 420 pontos. Aplicando assim o processo de regressão linear múltipla tem-se:

- $n = 420$
- $\sum Z = 572828$
- $\sum X = 52585,8$
- $\sum Y = 5900,89$
- $\sum XZ = 91803774,21$
- $\sum XY = 937009$
- $\sum YZ = 10182830,8$
- $\sum X^2 = 8509367,692$
- $\sum Y^2 = 104378$
- $\sum Z^2 = 1002975888$

Substituindo os valores nas equações (3.17), (3.18) e (3.19), encontram-se $\hat{a}_0, \hat{a}_1$ e $\hat{a}_2$.

$$\hat{a}_0 420 + \hat{a}_1 52585,8 + \hat{a}_2 5900,89 = 572828$$

$$\hat{a}_0 52585,8 + \hat{a}_1 8509367,692 + \hat{a}_2 937009 = 91803774,21$$

$$\hat{a}_0 5900,89 + \hat{a}_1 937009 + \hat{a}_2 104378 = 10182830,8$$

Logo, $\hat{a}_0 = -15,293439$, $\hat{a}_1 = 3,94454067$ e $\hat{a}_2 = 63,01159129$, assim substituindo na equação (3.16) tem-se:

$$z = 3,94454067 x + 63,01159129 y - 15,293439 \quad (3.28)$$

Calculando os coeficientes de determinação simples, de acordo com (3.25), (3.26), e (3.27) tem-se

$$r_{xy}^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2 = 0,9501 \Rightarrow r_{xy} = 0,97473$$

$$r_{zx}^2 = \left(\frac{n \sum ZX - \sum X \cdot \sum Z}{\sqrt{[n \sum Z^2 - (\sum Z)^2] \cdot [n \sum X^2 - (\sum X)^2]}} \right)^2 = 0,9449 \Rightarrow r_{zx} = 0,972$$

$$r_{zy}^2 = \left(\frac{n \sum ZY - \sum Y \cdot \sum Z}{\sqrt{[n \sum Z^2 - (\sum Z)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2 = 0,9573 \Rightarrow r_{zy} = 0,9784$$

Portanto, o coeficiente de determinação, de acordo com (3.24), é dado por :

$$r_{z,xy}^2 = \frac{r_{zx}^2 + r_{zy}^2 - 2r_{zx} r_{zy} r_{xy}}{1 - r_{xy}^2}$$

$$r_{z,xy}^2 = \frac{0,9449 + 0,9573 - 2 \cdot 0,972059 \cdot 0,978417 \cdot 0,9747307}{1 - 0,9501}$$

$$r_{z,xy}^2 = 0,964$$

Logo este coeficiente de determinação próximo de um, garante que os dados estão bem explicados pela equação de regressão.

Como existem duas variáveis independentes, a representação dos pontos já não é dada por uma reta e sim por um plano, como ilustrado na figura 3.5:

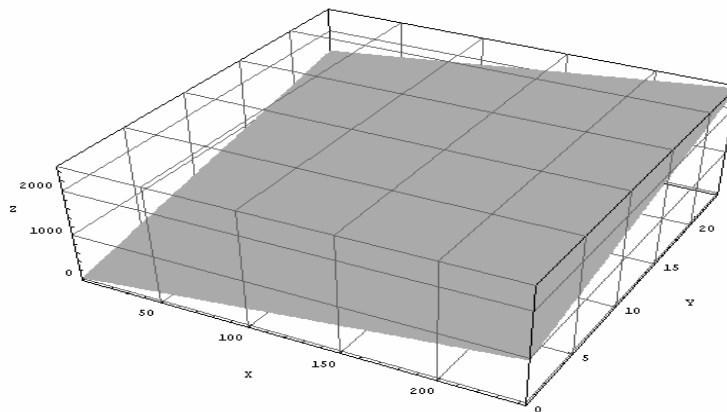


Figura 3.6 - Gráfico do processo de empacotar utilizando regressão linear múltipla.

3.7.2 - ANÁLISE DO PROCESSO DE GRANULAR E REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Os dados utilizados para obter a equação do processo de granular foram retirados da tabela A2, que contém um conjunto de 357 pontos. Aplicando assim o processo de regressão linear múltipla tem-se:

- $n = 357$
- $\sum Z = 1554629$
- $\sum X = 22749,54$
- $\sum Y = 3391,01$
- $\sum ZX = 143143328,1$
- $\sum XY = 313969,3$
- $\sum ZY = 20780082$
- $\sum X^2 = 2206897$
- $\sum Y^2 = 45919,85$
- $\sum Z^2 = 9523610273$

Substituindo os valores nas equações (3.17), (3.18) e (3.19), encontram-se $\hat{a}_0$, $\hat{a}_1$ e $\hat{a}_2$.

$$\hat{a}_0 357 + \hat{a}_1 22749,54 + \hat{a}_2 3391,01 = 1554629$$

$$\hat{a}_0 22749,54 + \hat{a}_1 2206897 + \hat{a}_2 313969,3 = 143143328,1$$

$$\hat{a}_0 3391,01 + \hat{a}_1 45919,85 + \hat{a}_2 313969,3 = 20780082$$

Logo, $\hat{a}_0 = 268,7493362$, $\hat{a}_1 = 19,6086533$ e $\hat{a}_2 = 298,6123795$, assim substituindo na equação (3.11) tem-se:

$$z = 19,6086533x + 298,6123795y + 268,7493362 \quad (3.29)$$

Calculando os coeficientes de determinação simples, de acordo com (3.25), (3.26), e (3.27) tem-se

$$r_{XY}^2 = \left(\frac{n \sum XY - \sum Y \cdot \sum X}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2 = 0,9229 \Rightarrow r_{XY} = 0,9606768$$

$$r_{ZX}^2 = \left(\frac{n \sum ZX - \sum X \cdot \sum Z}{\sqrt{[n \sum Z^2 - (\sum Z)^2] \cdot [n \sum X^2 - (\sum X)^2]}} \right)^2 = 0,9317 \Rightarrow r_{ZX} = 0,965246$$

$$r_{ZY}^2 = \left(\frac{n \sum ZY - \sum Y \cdot \sum Z}{\sqrt{[n \sum Z^2 - (\sum Z)^2] \cdot [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \right)^2 = 0,9578 \Rightarrow r_{ZY} = 0,9786725$$

Portanto, o coeficiente de determinação, de acordo com (3.24), é dado por :

$$r_{Z,XY}^2 = \frac{r_{ZX}^2 + r_{ZY}^2 - 2r_{ZX}r_{ZY}r_{XY}}{1 - r_{XY}^2}$$

$$r_{Z,XY}^2 = \frac{0,9317 + 0,9578 - 2 \cdot 0,965246 \cdot 0,9786725 \cdot 0,9606768}{1 - 0,9229}$$

$$r_{Z,XY}^2 = 0,9659$$

Logo, este coeficiente de determinação próximo de um, garante que os dados estão bem explicados pela equação de regressão.

Como existem duas variáveis independentes, a representação dos pontos será um plano, como representado na figura 3.6:

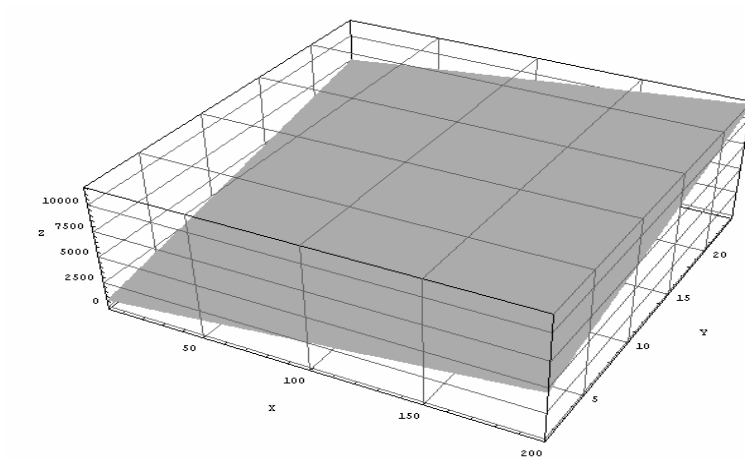


Figura 3.7 - Gráfico do processo de granular utilizando regressão linear múltipla.

Dos dados considerados nesta seção, pode-se concluir que, para analisar o comportamento da fábrica relativo aos processos de empacotar e granular, a regressão linear múltipla (no espaço) é mais adequada que a regressão linear simples, como visto na seção 3.4.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM

Este capítulo contém um modelo do funcionamento da desidratadora, apresentando a função objetivo e as restrições de um problema de programação linear inteiro misto para que o custo da energia elétrica da mesma seja minimizado.

4.1 – MODELAGEM DO FUNCIONAMENTO DA FÁBRICA

Para realizar a modelagem do funcionamento da fábrica, o processo de secagem foi analisado separadamente, ou seja, considerou-se uma média de kWh para esse processo e assumiu-se que ele seria realizado sempre dentro desta média. Isso foi necessário porque o tempo de funcionamento desta máquina de secagem depende do estado em que a forragem se encontra. Em épocas mais úmidas do ano, a umidade da forragem é maior, o tempo em que ela permanece na máquina para que essa umidade seja retirada também é maior e conseqüentemente o gasto de energia elétrica aumenta. Por essa razão considera-se uma média de 191,17kWh para a realização do processo de secagem.

O processo de secagem sempre será realizado com um dos dois processos, empacotar ou granular, de acordo com as tabelas 4.1 e 4.2 apresentadas a seguir.

Tabela 4.1 - Corresponde ao processo de empacotar (secar mais empacotar).

PROCESSO DE EMPACOTAR	
SECAR	EMPACOTAR
191,17	$z = 3,944x + 63,011y - 15,293$

Tabela 4.2 - Corresponde ao processo de granular (secar mais granular).

PROCESSO DE GRANULAR	
SECAR	GRANULAR
191,17	$z = 19,608x + 298,612y + 268,749$

As equações obtidas em (3.28) e (3.29), ($z = 3,944x + 63,011y - 15,293$ e $z = 19,608x + 298,612y + 268,749$) possuem duas variáveis independentes, a variável de produção x e a variável de tempo y . Porém necessita-se que o tempo seja fixo e correspondente a apenas uma hora, ou seja, que ele não varie, pois o objetivo é determinar em que hora do dia serão produzidos pacotes ou grãos, sabendo que o preço da energia elétrica pode variar de hora em hora. Assim considera-se uma função em que o tempo não esteja variando. Por esse motivo a variável y dos processos de granular e empacotar assumirá o valor um, referente a uma hora, conforme mostrado nas tabelas 4.3 e 4.4:

Tabela 4.3 - Corresponde ao processo de empacotar (secar mais empacotar), durante uma hora.

PROCESSO DE EMPACOTAR	
SECAR	EMPACOTAR
191,17	$y = 3,944x + 47,718$

Tabela 4.4 - Corresponde ao processo de granular (secar mais granular), durante uma hora.

PROCESSO DE GRANULAR	
SECAR	GRANULAR
191,17	$y = 19,608x + 567,361$

Apresenta-se a seguir a função objetivo que modelará o funcionamento da fábrica, fornecendo o custo de energia (CE) da produção diária:

$$CE = Pr_1 \cdot (191,17 + 3,944x_{1arr} + 47,718b_{1arr} p_{1arr} + 19,608x_{2arr} + 567,361b_{2arr} p_{2arr}) + \quad (4.1)$$

$$+ \sum_{h=2}^{24} Pr_h \cdot \left(\begin{aligned} &191,17 + 3,944x_{1h} + 47,718b_{1h} + 19,608x_{2h} + 567,361b_{2h} + \\ &+ 3,944x_{1c,h} + 47,718b_{1c,h} p_{1c} + 19,608x_{2c,h} + 567,361b_{2c,h} p_{2c} \end{aligned} \right)$$

A fábrica iniciará seu funcionamento com o processo de secar e logo em seguida realizará um dos dois passos, empacotar $(3,944x_{1arr} + 47,718b_{1arr} p_{1arr})$ ou granular $(19,608x_{2arr} + 567,361b_{2arr} p_{2arr})$. Esta escolha será feita de acordo com o preço da energia elétrica. Após a realização de um dos dois processos (granular ou empacotar), se o preço da energia elétrica for favorável, ela poderá trocar de passo, ou seja, se a fábrica iniciar sua produção com o processo de empacotar, ela poderá passar a produzir grãos após ter produzido os fardos de feno. Esta troca de processo só será realizada se o preço da energia for alterado.

Assim, o objetivo é fazer com que haja redução do custo da produção, escolhendo a hora adequada para a realização de cada processo.

Definem-se a seguir as variáveis de produção e as variáveis Booleanas que compõem a função objetivo.

1 - Variáveis de produção.

x_{1arr} - Variável referente à produção de pacotes, no momento em que a fábrica é inicializada.

x_{2arr} - Variável referente à produção de grãos, no momento em que a fábrica é inicializada.

$x_{1c,h}$ - Variável referente ao processo de empacotar, no momento em que houve uma mudança de processo, ou seja, quando a fábrica estava produzindo grãos e passou a produzir pacotes.

$x_{2c,h}$ - Variável referente ao processo de granular, no momento em que houve uma mudança de processo, ou seja, quando a fábrica estava produzindo pacotes e passou a produzir grãos.

x_{1h} - Variável referente ao processo de empacotar, no momento em que a produção está normalizada, ou seja, não está em hora de inicialização da fábrica e não está em momento de troca de processo.

x_{2h} - Variável referente ao processo de granular, no momento em que a produção está normalizada, ou seja, não está em hora de inicialização da fábrica e não está em momento de troca de processo.

2 – Variáveis Booleanas.

b_{1arr} - Esta variável assumirá apenas dois valores, zero ou um, ela servirá para anular o processo de empacotar na primeira hora de funcionamento da fábrica, se assumir o valor zero, mas se assumir o valor um, este processo será executado.

b_{2arr} - Esta, da mesma forma, assumirá apenas dois valores, zero ou um, e servirá para anular o processo de granular na primeira hora de funcionamento da fábrica, se assumir o valor zero ou executará esse processo se assumir o valor um.

$b_{1c,h}$ - Esta assumirá valores zero ou um, para determinar se a fábrica passará ou não a produzir pacotes.

$b_{2c,h}$ - Esta assumirá valores zero ou um, para determinar se a fábrica passará ou não a produzir grãos.

b_{1h} - Assumirá os valores zero ou um, para determinar se ocorrerá produção em hora normalizada para o processo de empacotar.

b_{2h} - Assumirá os valores zero ou um, para determinar a produção em hora normalizada para o processo de granular.

Os dados seguintes são constantes fixadas pela fábrica:

$p_{1arr} = p_{2arr}$ - Fator de redução da produção (empacotar e granular, respectivamente) com respeito a produção máxima horária durante a hora de início do processo. Seu valor é 0,35.

$p_{1c} = p_{2c}$ - Fator de redução da produção (empacotar e granular, respectivamente) com respeito a produção máxima horária durante a hora de mudança de processo. Seu valor é 0,75.

$P_{1MIN} = P_{2MIN}$ - Fator de redução da produção (empacotar e granular, respectivamente) em qualquer hora. Seu valor será 0,5.

Utilizaram-se os valores para Pr (preço da energia elétrica) de acordo com os dados da tabela 4.5, sendo:

Pr_1 - Preço da energia elétrica na primeira hora (Euro/kWh).

Pr_h - Preço da energia elétrica na hora “h” (Euro/kWh).

Tabela 4.5 - Preços de energia elétrica

HORAS	OMEL F. J.	TARIFA F. J.	OMEL U. J.	TARIFA U. J.	OMEL F. S.	OMEL U. S.	TARIFA U. S.
1	4,33	4,7	3,16	4,69	4,5	5,42	4,5
2	2,99	4,69	2,82	4,69	2,99	3,27	4,69
3	3,01	4,69	2,67	4,69	3,02	3,32	4,69
4	2,84	4,69	2,69	4,69	2,84	3,03	4,69
5	2,76	4,69	2,67	4,69	2,77	3,05	4,69
6	2,69	4,69	2,64	4,69	2,7	3,16	4,69
7	2,64	4,69	3,01	4,69	2,65	3,69	4,69
8	2,74	4,69	4,04	4,69	2,75	5,52	4,69
9	2,81	4,69	6,86	8,23	2,82	6,17	8,23
10	3,73	4,69	7,1	8,23	3,73	6,88	16,46
11	3,4	4,69	6,93	8,23	3,41	6,92	16,46
12	3,75	4,69	6,7	8,23	3,75	7,59	16,46
13	3,8	4,69	6,19	8,23	3,8	7,63	16,46
14	3,76	4,69	6,16	8,23	3,76	7,58	16,46
15	4,27	4,69	5,81	8,23	4,28	7,36	16,46
16	2,92	4,69	5,81	8,23	2,92	8,07	8,23
17	2,8	4,69	6,56	8,23	2,8	7,83	8,23
18	3,16	4,69	6,64	16,46	3,17	7,92	8,23
19	3,37	4,69	7,64	16,46	3,38	6,93	8,23
20	3,7	4,69	8,91	16,46	3,71	6,18	8,23
21	3,71	4,69	7,99	16,46	3,71	5,96	8,23
22	3,46	4,69	6,57	16,46	3,47	6,49	8,23
23	2,82	4,69	5,77	16,46	2,82	6,13	8,23
24	3,28	4,69	5,57	8,23	3,29	4,14	8,23

Estes valores correspondem ao preço da energia elétrica em vinte e quatro horas, estabelecidos pelos fornecedores, sendo:

OMEL F. J. – OMEL para feriados de janeiro.

TARIFA F. J. – Tarifa Regulada para feriados de janeiro.

OMEL U. J. – OMEL para dias úteis de janeiro.

TARIFA U. J. – Tarifa Regulada para dias úteis de janeiro.

OMEL F. S. – OMEL para feriados de setembro.

OMEL U. S. – OMEL para dias úteis de setembro.

TARIFA U. S. – Tarifa Regulada para dias úteis de setembro.

As máquinas da fábrica possuem um limite de produção horário para cada processo, assim é possível produzir no máximo onze toneladas de pacote ($x_{1MAX} = 11$) ou no máximo oito toneladas de grãos ($x_{2MAX} = 8$) por hora.

Para a produção de pacotes na primeira hora, tem-se:

$$y = (3,944x_{MAX} + 47,718)p_{1arr} \quad (4.2)$$

$$y = (3,944x_{MAX}.p_{1arr} + 47,718p_{1arr}) \quad (4.3)$$

$$y = (3,944x_{1arr} + 47,718p_{1arr}) \quad (4.4)$$

Para a produção de pacotes a partir da primeira hora, ou seja, após o início do funcionamento da fábrica, ou também após uma mudança de processo, ou seja, quando o processo passa a ser realizado normalmente, tem-se:

$$y = (3,944x_{MAX} + 47,718) \quad (4.5)$$

$$y = (3,944x_{1h} + 47,718) \quad (4.6)$$

Quando ocorre troca de processos e se passa a realizar a produção de pacotes, tem-se:

$$y = (3,944x_{MAX} + 47,718)p_{1c} \quad (4.7)$$

$$y = (3,944x_{MAX}.p_{1c} + 47,718p_{1c}) \quad (4.8)$$

$$y = (3,944x_{1c,h} + 47,718p_{1c}) \quad (4.9)$$

Analogamente, para a produção de grãos na primeira hora, tem-se:

$$y = (19,608x_{MAX} + 567,361)p_{2arr} \quad (4.10)$$

$$y = (19,608x_{MAX}.P_{2arr} + 567,361p_{2arr}) \quad (4.11)$$

$$y = (19,608x_{2arr} + 567,361p_{2arr}) \quad (4.12)$$

Para a produção de grãos a partir da primeira hora, ou seja, após o início do funcionamento da fábrica, ou também após uma mudança de processo, ou seja, quando o processo passa a ser realizado normalmente, tem-se:

$$y = (19,608x_{MAX} + 567,361) \quad (4.13)$$

$$y = (19,608x_{2h} + 567,361) \quad (4.14)$$

Quando ocorre troca de processos e se passa a realizar a produção de grãos, tem-se:

$$y = (19,608x_{MAX} + 567,361)p_{2cr} \quad (4.15)$$

$$y = (19,608x_{MAX}.p_{2c} + 567,361p_{2c}) \quad (4.16)$$

$$y = (19,608x_{2c,h} + 567,361p_{2c}) \quad (4.17)$$

Restrições:

Inicia-se a produção com apenas um dos processos:

$$b_{1arr} + b_{2arr} = 1 \quad (4.18)$$

Neste momento tem-se:

$$b_{11} = b_{21} = 0 \quad (4.19)$$

$$b_{1c1} = b_{2c1} = 0 \quad (4.20)$$

As restrições a seguir serão consideradas após a primeira hora de produção. Elas são fundamentais, pois garantem o bom desenvolvimento do processo. Essas desigualdades determinam quando haverá troca de processo ou produção normal sem troca.

$$b_{1c,h-1} + b_{1c,h} \leq 1 \quad (4.21)$$

$$b_{2c,h-1} + b_{2c,h} \leq 1 \quad (4.22)$$

$$b_{1h-1} + b_{1c,h} \leq 1 \quad (4.23)$$

$$b_{2h-1} + b_{2c,h} \leq 1 \quad (4.24)$$

As restrições seguintes são referentes à produção na primeira hora. Estas restrições limitam a produção no primeiro momento de funcionamento da fábrica:

$$x_{1arr} \geq p_{1arr} x_{1MAX} P_{1MIN} b_{1arr} \quad (4.25)$$

$$x_{1arr} \leq p_{1arr} x_{1MAX} b_{1arr} \quad (4.26)$$

$$x_{2arr} \geq p_{2arr} x_{2MAX} P_{2MIN} b_{2arr} \quad (4.27)$$

$$x_{2arr} \leq p_{2arr} x_{2MAX} b_{2arr} \quad (4.28)$$

$$x_{11} = x_{21} = 0 \quad (4.29)$$

$$x_{1c,1} = x_{2c,1} = 0 \quad (4.30)$$

Restrições que limitam a produção em hora de funcionamento normal:

$$x_{1h} \geq x_{1MAX} P_{1MIN} b_{1h} \quad (4.31)$$

$$x_{1h} \leq x_{1MAX} b_{1h} \quad (4.32)$$

$$x_{2h} \geq x_{2MAX} P_{2MIN} b_{2h} \quad (4.33)$$

$$x_{2h} \leq x_{2MAX} b_{2h} \quad (4.34)$$

Restrições que limitam a produção em hora de mudança de processo.

$$x_{1c,h} \geq p_{1c} x_{1MAX} P_{1MIN} b_{1c,h} \quad (4.35)$$

$$x_{1c,h} \leq p_{1c} x_{1MAX} b_{1c,h} \quad (4.36)$$

$$x_{2c,h} \geq p_{2c} x_{2MAX} P_{2MIN} b_{2c,h} \quad (4.37)$$

$$x_{2c,h} \leq p_{2c} x_{2MAX} b_{2c,h} \quad (4.38)$$

As seguintes restrições garantem a produção dos dois produtos. Elas determinam a quantidade de produção diária que deverá existir no final do processo:

$$x_{1arr} + \sum_{h=2}^{24} x_{1h} + \sum_{h=3}^{24} x_{1c,h} = x_{1STOCK} \quad (4.39)$$

$$x_{2arr} + \sum_{h=2}^{24} x_{2h} + \sum_{h=3}^{24} x_{2c,h} = x_{2STOCK} \quad (4.40)$$

x_{1STOCK} - Quantidade mínima de toneladas de pacotes para a produção diária. Seu valor será 78 toneladas para uma produção de 60%, 104 toneladas para 80%, e 130 para 100%;

x_{2STOCK} - Quantidade mínima de toneladas de grãos para a produção diária. Seu valor será 36 toneladas para uma produção de 60%, 48 toneladas para 80%, e 60 para 100%.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO

Apresentam-se neste capítulo os resultados obtidos por meio da implementação realizada no software Lingo, usando a função objetivo definida em (4.1) e as restrições (4.18) - (4.40). Estes resultados encontram-se nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 e podem ser observados através dos gráficos elaborados.

5.1 – RESULTADOS

Tem-se por finalidade apresentar os resultados obtidos utilizando os preços da Tabela 4.5 do capítulo anterior, observando as produções dos produtos (pacotes de feno e grãos de feno) quando a fábrica utiliza 60%, 80% e 100% da sua capacidade. Para a produção a 60%, obtêm-se valores maiores ou iguais a 78 toneladas de pacotes e 36 toneladas de grãos, para a produção a 80%, obtêm-se valores maiores ou iguais a 104 toneladas de pacotes e 48 toneladas de grãos e para a produção a 100%, obtêm-se valores maiores ou iguais a 130 toneladas de pacotes e 60 toneladas de grãos.

5.1.1 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO 60% DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

Os resultados da tabela 5.1 fornecem a quantidade de horas que a fábrica deve realizar cada processo, juntamente com a quantidade de toneladas de cada produto, incluindo os momentos de mudança de processo. Nela encontra-se também, o preço médio diário de cada fornecedor em feriados e dias úteis dos meses de janeiro e setembro. É apresentada a produção total diária e na última linha da tabela encontra-se o custo da energia elétrica para realizar essa produção, considerando que a fábrica estará utilizando apenas 60% de sua capacidade.

Tabela 5.1 – Resultados da implementação realizada, utilizando 60% da capacidade da fábrica.

		OMEL F. J.	TARIFA F. J.	OMEL U. J.	TARIFA U. J.	OMEL F. S.	OMEL U. S.	TARIFA U. S.
HORAS DE PRODUÇÃO	PACOTES	12	12	17	17	12	18	16
	GRÃOS	0	0	3	3	0	3	3
	M. PACOTES	6	6	2	2	6	1	2
	M. GRÃOS	6	6	2	2	6	2	2
PRODUÇÃO EM TONELADA	PACOTES	62,425	62,425	89,925	89,925	62,425	95,425	89,925
	GRÃOS	0	0	24	24	0	24	24
	M. PACOTES	24,75	24,75	8,25	8,25	24,75	4,125	8,25
	M. GRÃOS	36	36	12	12	36	12	12
	PRODUÇÃO TOTAL	123,175	123,175	134,175	134,175	123,175	135,55	134,175
VALOR EM EURO	PREÇO MÉDIO	3,28	4,69	5,45	9,11	3,29	5,84	9,1
	CUSTO	27977,83	41960,37	42210,8	70169,96	28066,58	45814,18	70129,03

Em que:

PACOTES – Significa produção normal, ou seja, momento em que está ocorrendo a produção de pacotes, incluindo a primeira hora de funcionamento da fábrica, caso tenha iniciado com esse processo.

GRÃOS - Significa produção normal, ou seja, momento em que está ocorrendo a produção de grãos, incluindo a primeira hora de funcionamento da fábrica, caso tenha iniciado com esse processo.

M. PACOTES – Significa **mudança** de processo, ou seja, momento em que se passa a produzir pacotes;

M. GRÃOS – Significa **mudança** de processo, ou seja, momento em que se passa a produzir grãos.

Para possibilitar melhor compreensão dos resultados obtidos, foram construídos vários gráficos referentes à situação da fábrica em relação aos preços da OMEL e da Tarifa Regulada, em dias normais de trabalho ou seja, em dias úteis e em feriados. Os gráficos mostram os momentos em que haverá mudança de processo e a quantidade em toneladas dos produtos (pacotes e grãos) em cada hora.

A figura 5.1 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica, em vinte e quatro horas para feriados do mês de janeiro com a Companhia Operadora de Mercado Espanhol de Eletricidade - OMEL. É possível observar a troca de processos quando o preço é alterado, passa-se a produzir maior quantidade de grãos quando o preço da energia elétrica está mais barato, e quando o preço aumenta passa-se a produzir pacotes de feno, já que este processo (empacotar) consome menor quantidade de energia. O preço da energia elétrica encontra-se em Euro e a quantidade de pacotes e de grãos em toneladas.

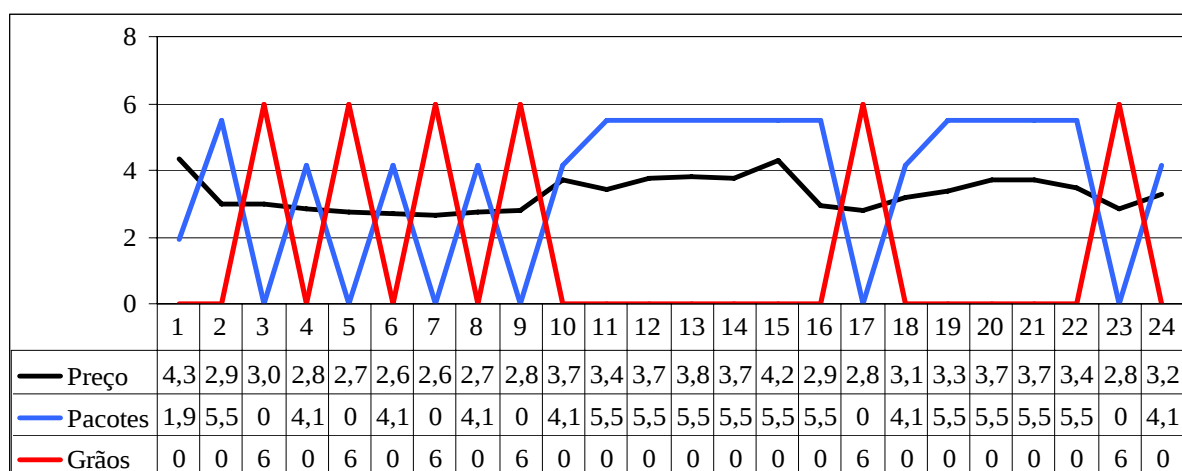


Figura 5.1 – Preço OMEL em feriados de janeiro para produção de 60%.

A figura 5.2 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de janeiro. Neste caso o preço da energia elétrica não possui alterações, ou seja, permanece constante nas vinte e quatro horas do dia. Sendo assim, o custo final da produção diária não é alterado de acordo com a ordem

de realização dos processos. O programa elaborado para otimização, não utiliza nenhum critério para obtenção desses resultados, e produz de forma aleatória o total de toneladas determinado na variável de estoque. O mesmo acontece nos resultados das figuras 5.9 e 5.16 deste capítulo.

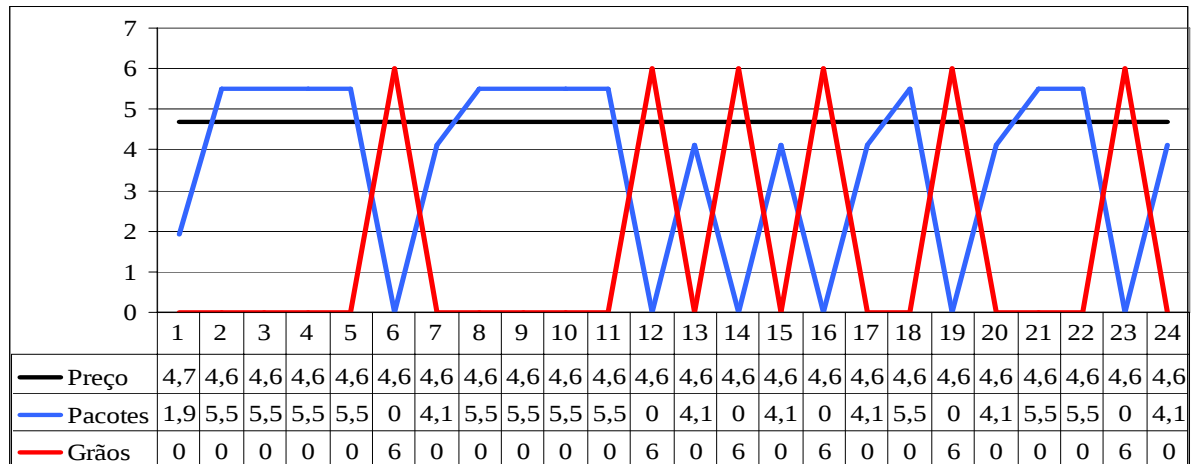


Figura 5.2 – Preço Tarifa Regulada em feriados de janeiro para produção de 60%.

A figura 5.3 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de janeiro.

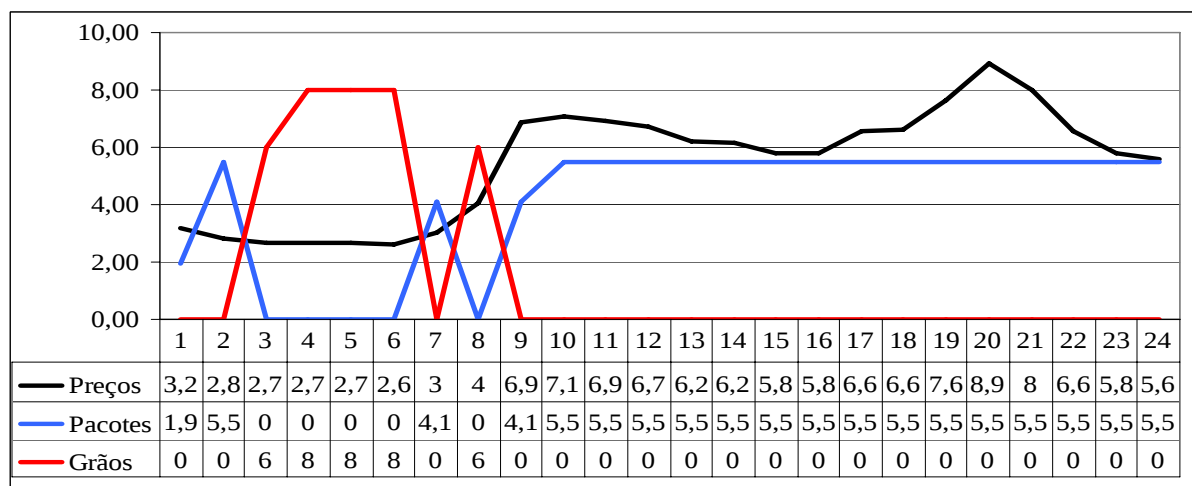


Figura 5.3 – Preço OMEL em dias úteis de janeiro para produção de 60%.

A figura 5.4 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de janeiro.

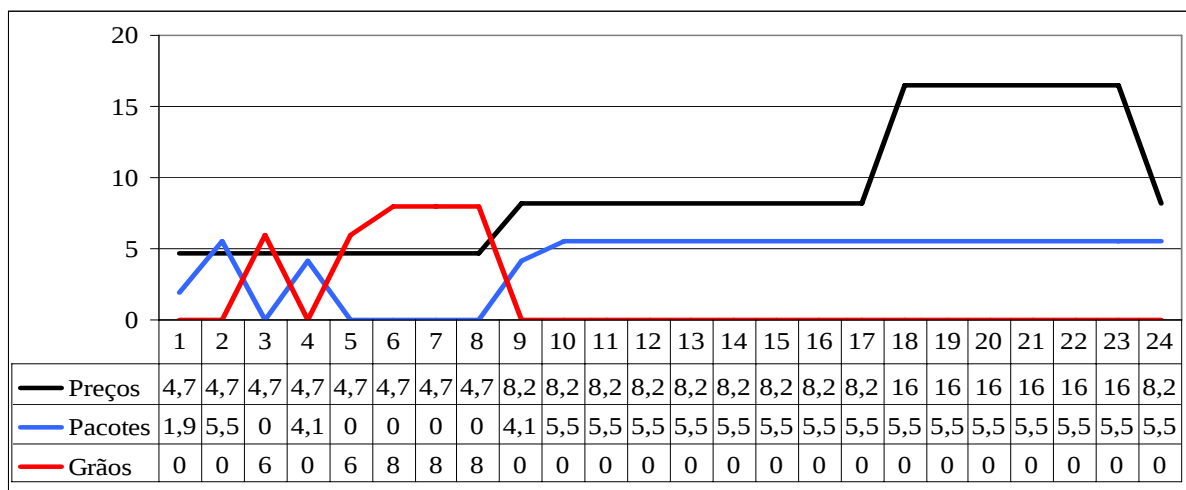


Figura 5.4 – Preço Tarifa Regulada em dias úteis de janeiro para produção de 60%.

A figura 5.5 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de setembro.

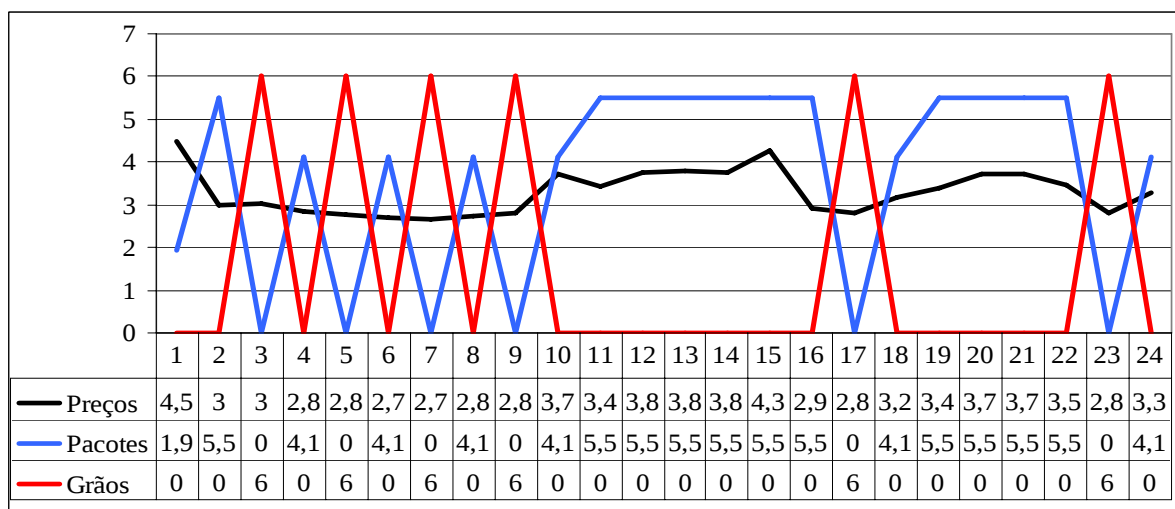


Figura 5.5 – Preço OMEL em feriados de setembro para produção de 60%.

A figura 5.6 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de setembro.

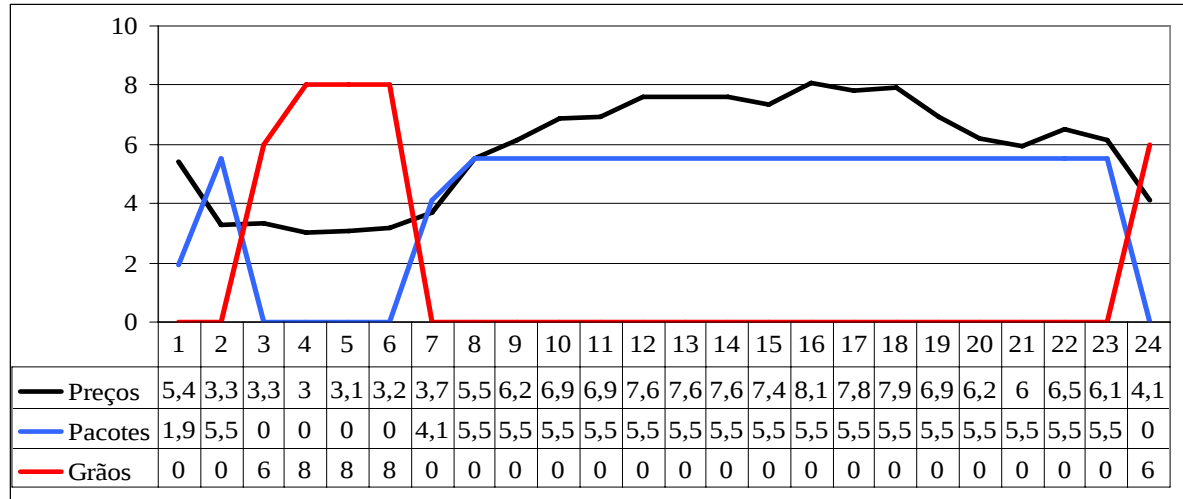


Figura 5.6 – Preço OMEL em dias úteis de setembro para produção de 60%.

A figura 5.7 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de setembro.

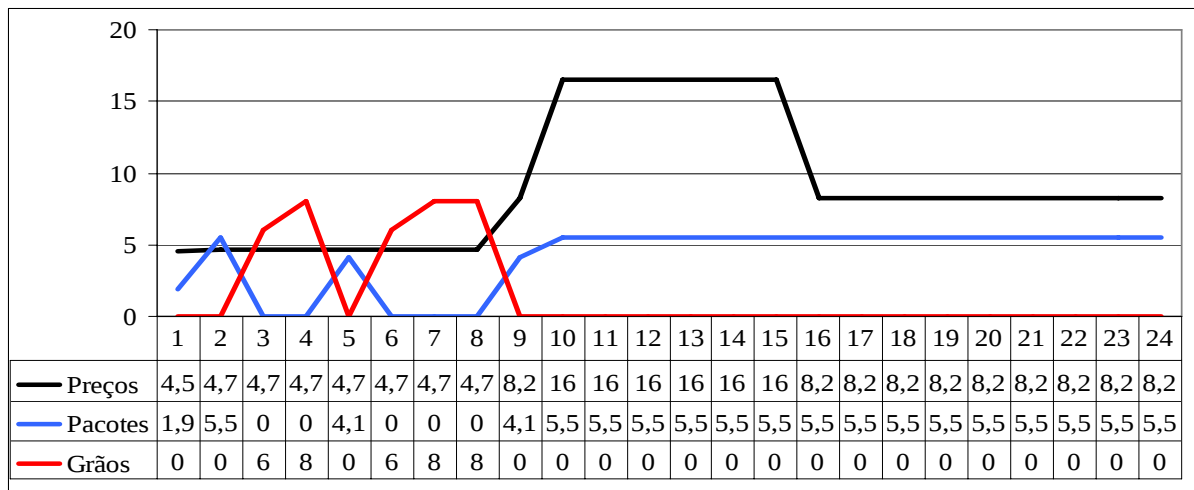


Figura 5.7 – Preço Tarifa Regulada em dias úteis de setembro para produção de 60%.

5.1.2 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO 80% DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

Os resultados da tabela 5.2 fornecem a quantidade de horas que a fábrica deve realizar cada processo, juntamente com a quantidade de toneladas de cada produto, incluindo os momentos de mudança de processo. Nela encontra-se também, o preço médio diário de cada fornecedor em feriados e dias úteis dos meses de janeiro e setembro. É apresentado a produção total diária e na última linha da tabela encontra-se o custo da energia elétrica para realizar essa produção, considerando que a fábrica estará utilizando apenas 80% de sua capacidade.

Tabela 5.2 – Resultados da implementação realizada, utilizando 80% da capacidade da fábrica.

		OMEI F. J.	TARIFA F. J.	OMEL U. J.	TARIFA U. J.	OMEL F. S.	OMEL U. S.	TARIFA U. S.
HORAS DE PRODUÇÃO	PACOTES	13	8	15	17	13	17	17
	GRÃOS	3	0	6	6	3	6	6
	M. PACOTES	4	8	2	1	4	1	1
	M. GRÃOS	4	8	1	0	4	0	0
PRODUÇÃO EM TONELADA	PACOTES	83,375	51,425	91,625	99,875	83,375	97,35	99,875
	GRÃOS	24	0	42,8	48	24	48	48
	M. PACOTES	20,625	52,575	12,375	4,125	20,625	6,65	4,125
	M. GRÃOS	24	48	5,2	0	24	0	0
	PRODUÇÃO TOTAL	152	152	152	152	152	152	152
VALOR EM EURO	PREÇO MÉDIO	3,28	4,69	5,45	9,11	3,29	5,84	9,1
	CUSTO	30957,58	46806,46	45453,58	75239,5	31052,27	49716,06	75197,12

A figura 5.8 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de janeiro, utilizando agora 80% da capacidade total da fábrica.

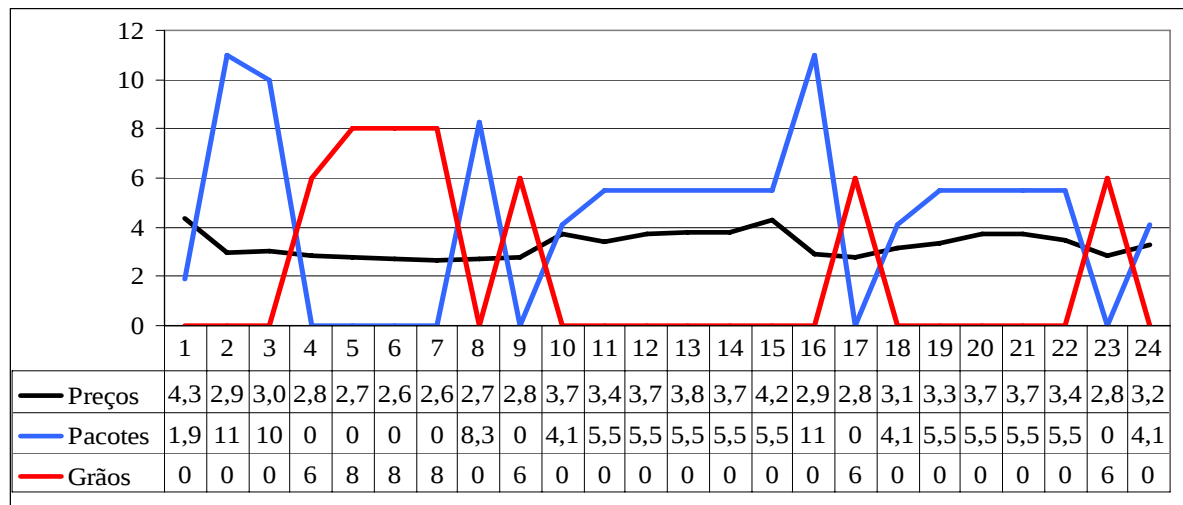


Figura 5.8 – Preço OMEL em feriados de janeiro para produção de 80%.

A figura 5.9 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de janeiro.

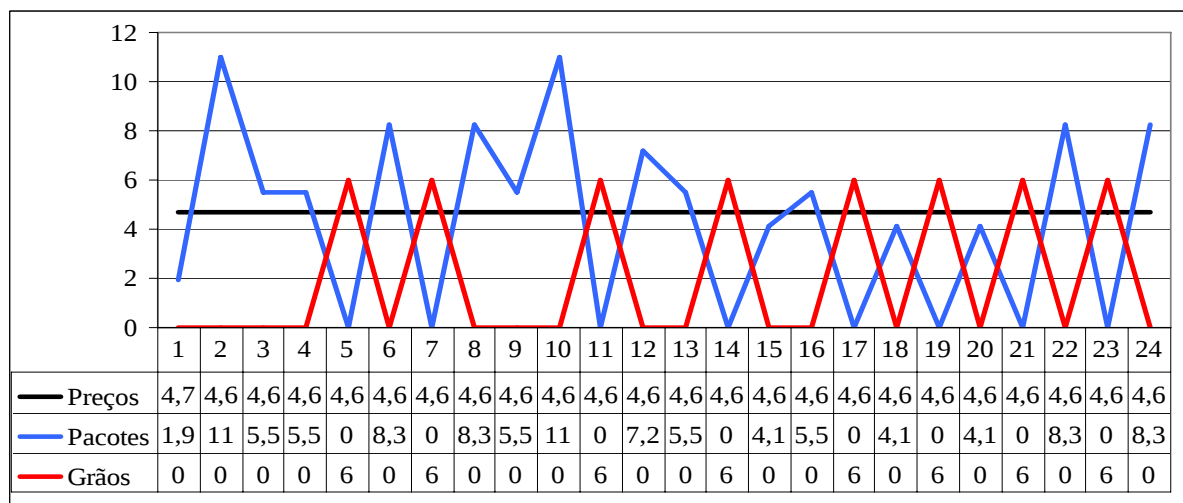


Figura 5.9 – Preço Tarifa Regulada em feriados de janeiro para produção de 80%.

A figura 5.10 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de janeiro.

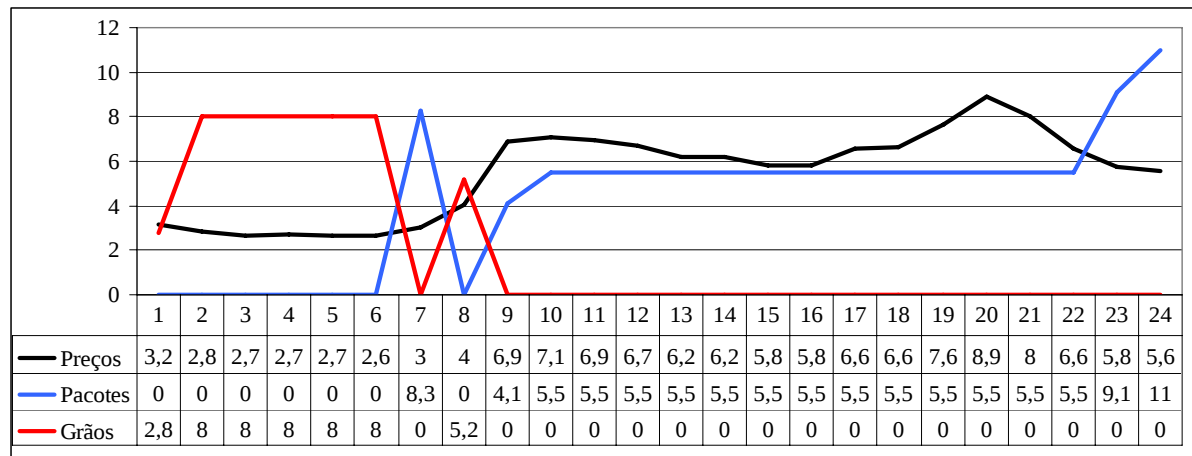


Figura 5.10 – Preço OMEL em dias úteis de janeiro para produção de 80%.

A figura 5.11 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de janeiro.

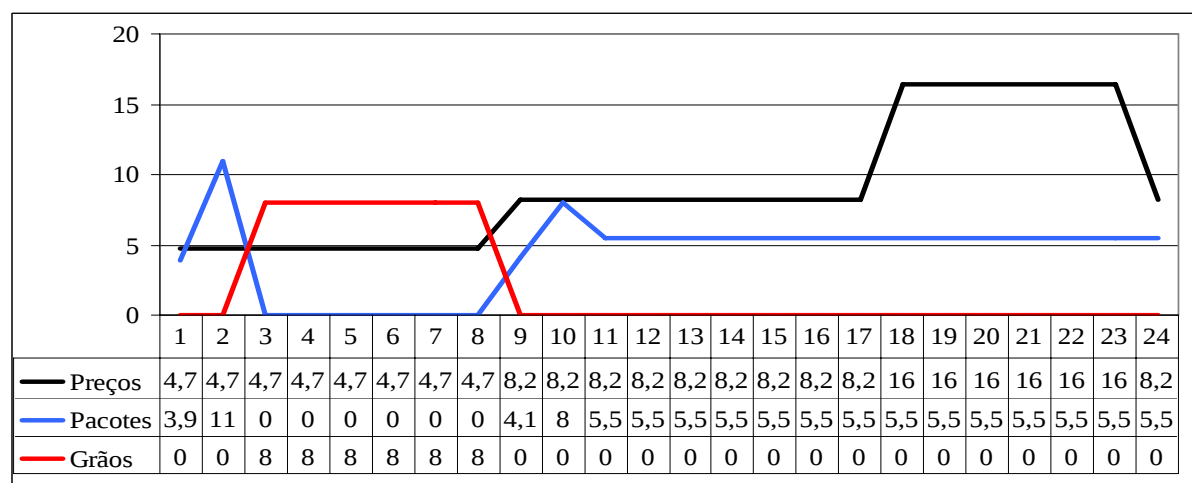


Figura 5.11 – Preço Tarifa Regulada em dias úteis de janeiro para produção de 80%.

A figura 5.12 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de setembro.

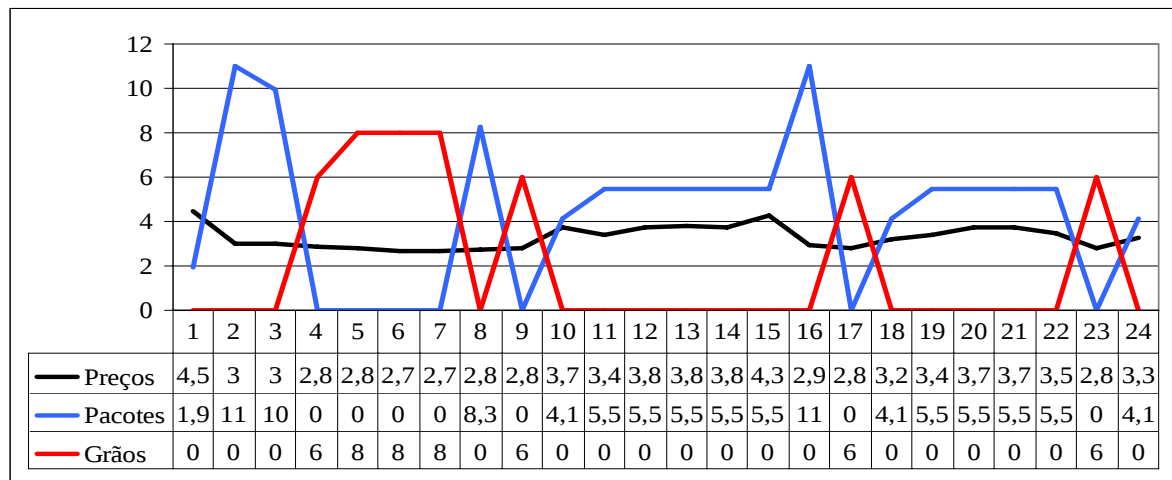


Figura 5.12 – Preço OMEL em feriados de setembro para produção de 80%.

A figura 5.13 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de setembro.

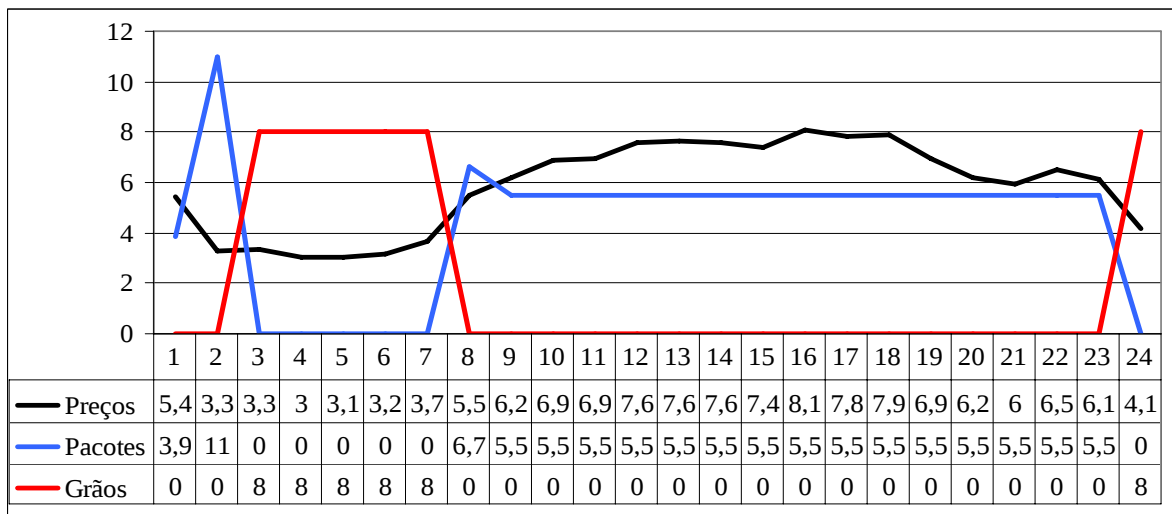


Figura 5.13 – Preço OMEL em dias úteis de setembro para produção de 80%.

A figura 5.14 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de setembro.

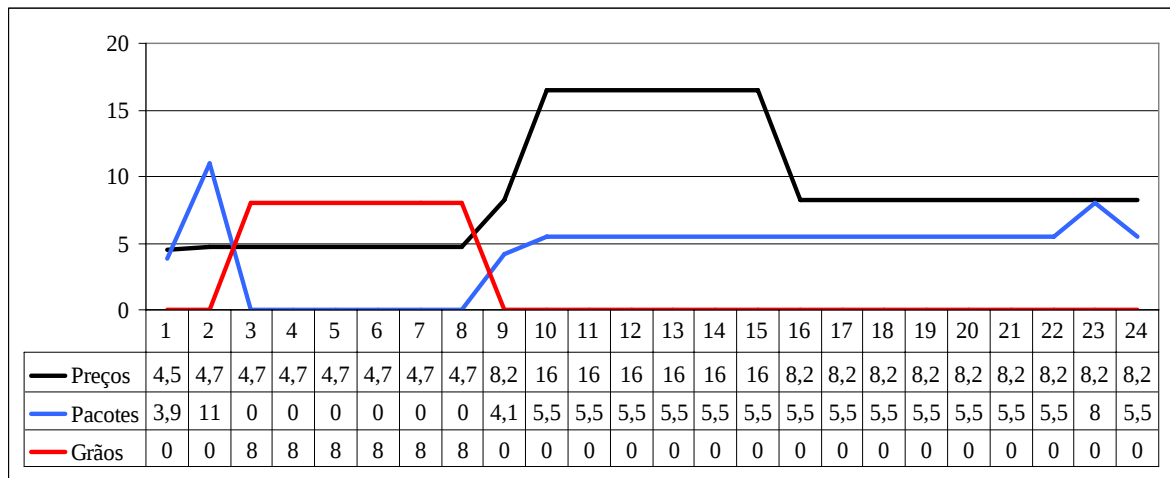


Figura 5.14 – Preço Tarifa Regulada em dias úteis de setembro para produção de 80%.

5.1.3 – RESULTADOS OBTIDOS UTILIZANDO 100% DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

De forma análoga, os resultados da tabela 5.3 fornecem a quantidade de horas que a fábrica deve realizar cada processo, juntamente com a quantidade de toneladas de cada produto, incluindo os momentos de mudança de processo. Nela encontra-se também, o preço médio diário de cada fornecedor em feriados e dias úteis dos meses de janeiro e setembro. É apresentado a produção total diária e na última linha da tabela encontra-se o custo da energia elétrica para realizar essa produção, considerando que a fábrica estará utilizando 100% de sua capacidade.

Tabela 5.3 – Resultados da implementação realizada, utilizando 100% da capacidade da fábrica.

		OMEI F. J.	TARIFA F. J.	OMEL U. J.	TARIFA U. J.	OMEL F. S.	OMEL U. S.	TARIFA U. S.
HORAS DE PRODUÇÃO	PACOTES	13	8	14	13	13	13	13
	GRÃOS	6	0	8	8	6	7	8
	M. PACOTES	3	6	1	2	3	2	2
	M. GRÃOS	2	10	1	1	2	2	1
PRODUÇÃO EM TONELADA	PACOTES	109,375	80,5	125,875	117,625	109,375	113,5	113,5
	GRÃOS	48	0	57	57	48	50,8	57
	M. PACOTES	20,625	49,5	4,125	12,375	20,625	16,5	16,5
	M. GRÃOS	12	60	3	3	12	9,2	3
	PRODUÇÃO TOTAL	190	190	190	190	190	190	190
VALOR EM EURO	PREÇO MÉDIO	3,28	4,69	5,45	9,11	3,29	5,84	9,1
	CUSTO	34232,42	52045,86	51389,73	83828,66	34336,72	55875,78	83931,5

A figura 5.15 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de janeiro, utilizando agora 100% da capacidade total da fábrica.

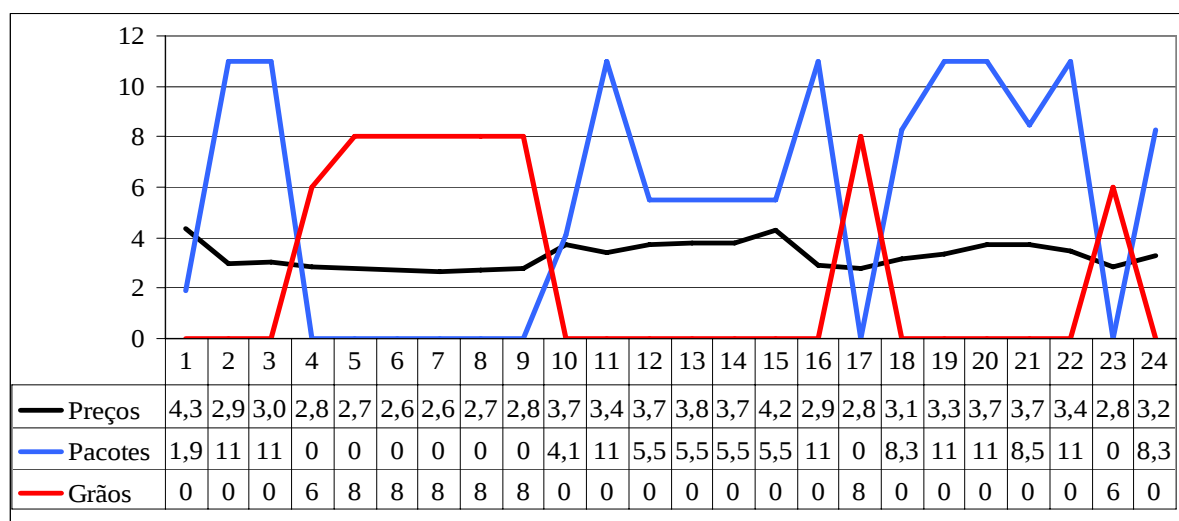


Figura 5.15 – Preço OMEL em feriados de janeiro para produção de 100%.

A figura 5.16 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas para feriados do mês de janeiro.

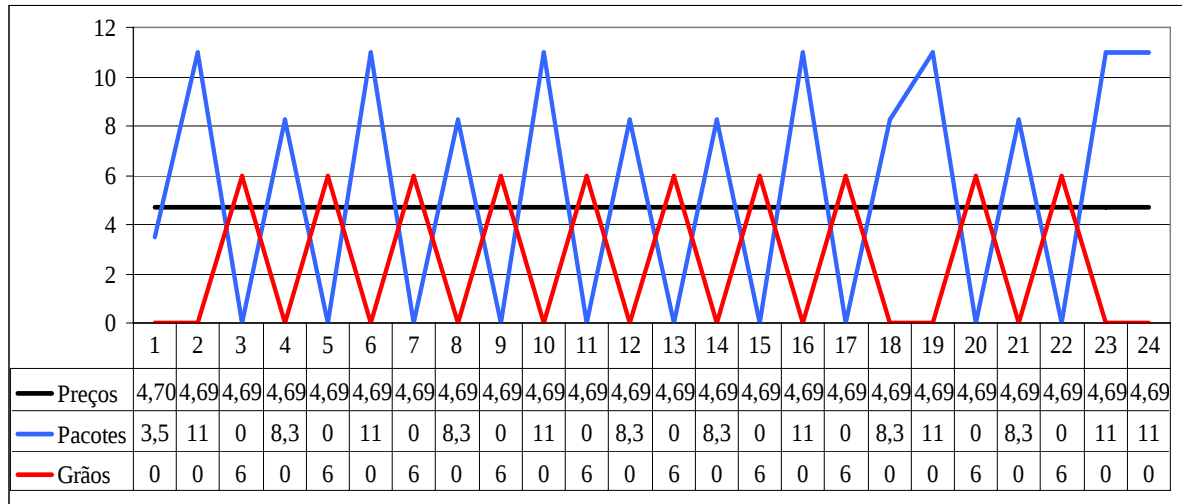


Figura 5.16 – Preço Tarifa Regulada em feriados de janeiro para produção de 100%.

A figura 5.17 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de janeiro.

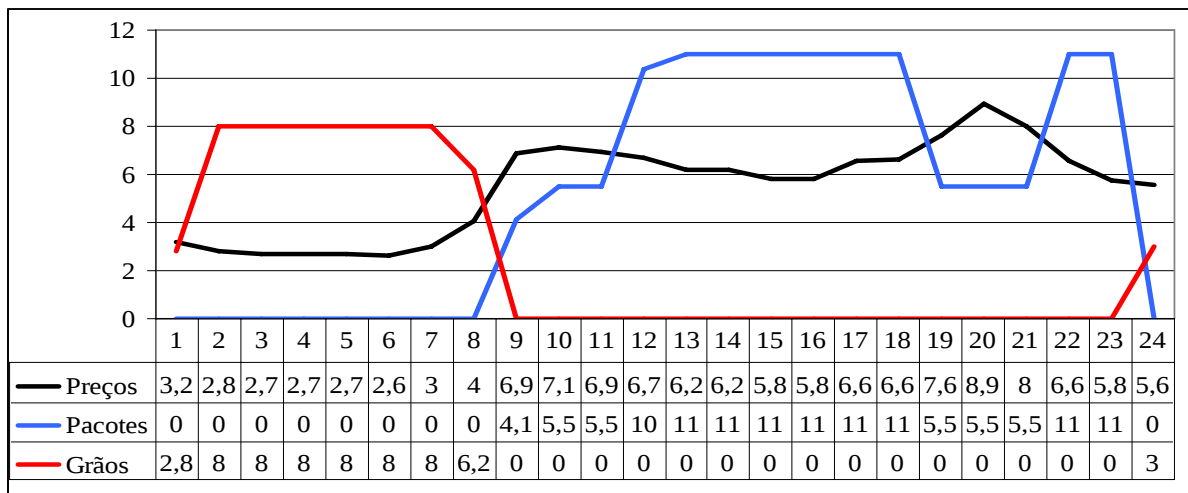


Figura 5.17 – Preço OMEL em dias úteis de janeiro para produção de 100%.

A figura 5.18 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de janeiro.

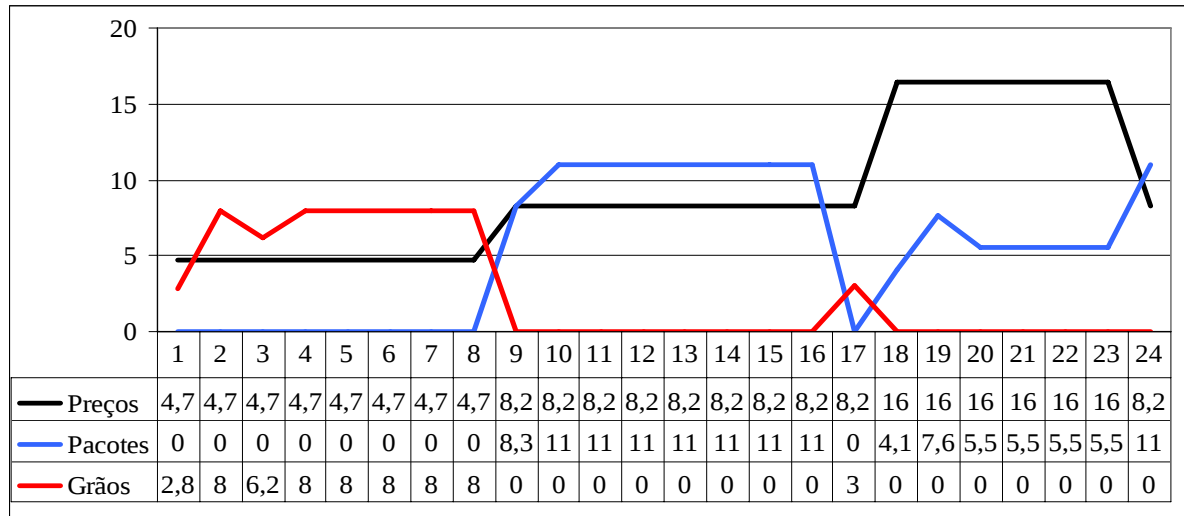


Figura 5.18 – Preço Tarifa Regulada em dias úteis de janeiro para produção de 100%.

A figura 5.19 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para feriados do mês de setembro.

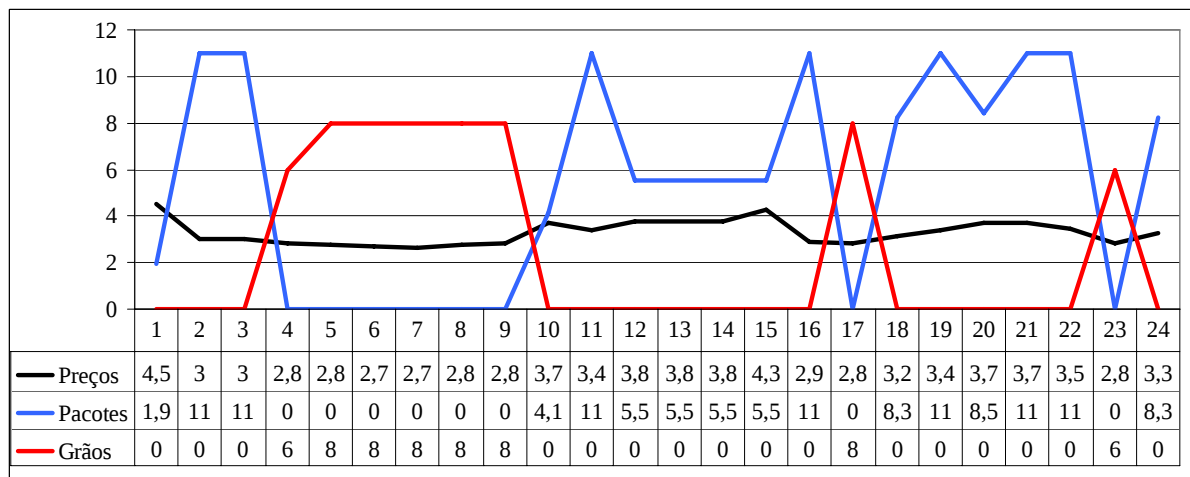


Figura 5.19 - Preço OMEL em feriados de setembro para produção de 100%.

A figura 5.20 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da OMEL, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de setembro.

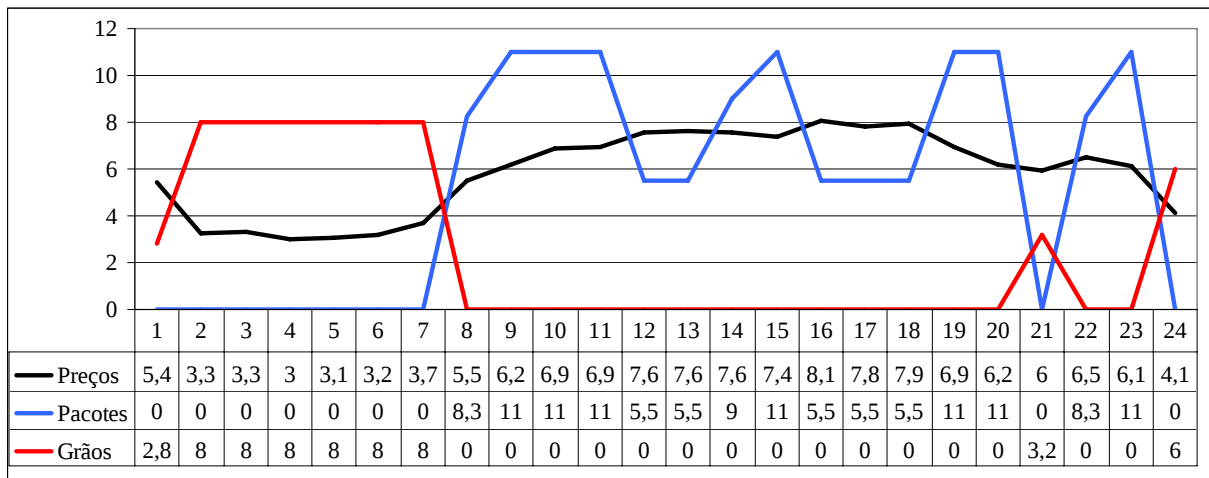


Figura 5.20 – Preço OMEL em dias úteis de setembro para produção de 100%.

A figura 5.21 retrata o comportamento da fábrica em função do preço da energia elétrica da Tarifa Regulada, em vinte e quatro horas, para dias úteis do mês de setembro.

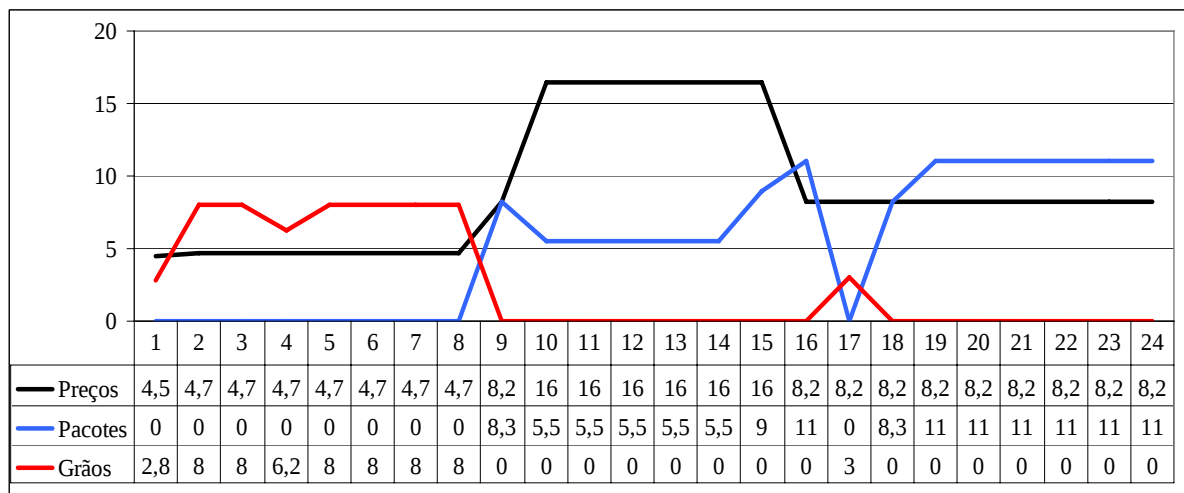


Figura 5.21 – Preço Tarifa Regulada em dias úteis de setembro para produção de 100%.

Das seções 5.1.1 – 5.1.3, pode-se concluir que, se a fábrica seguir os dados que constam nas tabelas das figuras deste capítulo (figuras 5.1 – 5.21), ela minimizará o custo da energia elétrica, uma vez que está sendo encaixada a melhor hora para produzir a quantidade de toneladas adequada de cada produto.

CONCLUSÃO

Com o objetivo de buscar um melhor desempenho, com menor custo de produção para a desidratadora Virgen de la Corona, localizada na Espanha, procuraram-se funções que melhor representasse o funcionamento dessa empresa.

Nas funções obtidas por meio do método de regressão linear múltipla (capítulo 3) alcançou-se melhores resultados para o coeficiente de determinação, estes são extremamente mais significativos que os valores dos coeficientes de determinação das funções obtidas pelo método de regressão linear simples, em que os valores das toneladas e dos kilowatts apresentam-se divididos pelo tempo.

Essas funções obtidas pelo método de regressão linear múltipla foram utilizadas para compor a função objetivo, com a finalidade de resolver um problema de programação linear inteiro misto. Esse modelo foi implementado utilizando o software Lingo.

A implementação realizada teve como resultado os custos diários para a energia elétrica, juntamente com a quantidade de horas que os processos de empacotar e de granular devem ser realizados por dia, e sua ordem de realização. Para que a fábrica saiba como esta otimização se tornará possível, determinou-se também, a quantidade de toneladas para cada hora e processo. Seguindo esses dados, ela terá o custo diário da energia elétrica minimizado.

Utilizaram-se sete alternativas de preços para realizar os testes (tabela 4.5), considerando dias úteis e feriados do mês de janeiro (período de mais umidade) e dias úteis e feriados de setembro (período do ano com pouca umidade). Para cada alternativa de preço consideraram-se limites de produção diária para a fábrica, observando o custo da energia elétrica

quando for utilizado 60%, 80% e 100% da capacidade de produção. Com a análise gráfica realizada no último capítulo é possível observar como a variação dos preços da energia elétrica influencia na troca dos processos e na quantidade de toneladas de produção em cada hora.

As tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 do último capítulo apresentam as horas totais de produção de fardos e de grãos, incluindo as horas totais em que houve mudança de processo. Nelas encontra-se também a quantidade total de toneladas para cada produto, incluindo as toneladas produzidas nos momentos de troca de processo. Os gráficos elaborados permitem observar a quantidade de toneladas produzidas em cada hora e os momentos em que houve as trocas. Permitem observar também o preço da energia elétrica em cada hora.

Todos os dados deste trabalho, como as tabelas do apêndice e a descrição do funcionamento dos processos, foram fornecidos pela desidratadora Virgen de la Corona, localizada na Espanha.

Seria interessante, em trabalhos futuros, realizar alguns testes utilizando limites de produção diferente, para que a fábrica tenha maiores alternativas de porcentagem de produção, ou seja, alternativas de estoque diário, avaliando as possibilidades de combinações das variáveis de estoque.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Decreto de 2000**. Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>>. Acesso em 12 de julho de 2006

BARBOSA, Ruy Madsen. **Programação Linear**. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 1973. 229 p.

BAZARAA, Mokhtar S.; JAVIS, John J.; SHERALI, Hanif D.. **Programing and Network Flows**. New York, Willey 1990. 684 p.

BUSSAB, Wilton O.; MORETTIN, Pedro A.. **Estatística Básica**. São Paulo, Atual Editora, 1987. 321 p.

CARVALHO, Antônio Carlos de. **Estudo de Caso: Diagnóstico do Consumo e da Qualidade de Energia Numa Indústria Metalúrgica**. 2004. 126 P. Mestrado (Dissertação) - Unesp, Ilha Solteira, 2004.

COSTA NETO, Pedro Luiz de Oliveira. **Estatística**. São Paulo, Editora Edgard Blucher LTDA, 1977. 264 p..

ENERGIA DE PORTUGAL. **O Sistema Elétrico Espanhol**. Lisboa, 2006. Disponível em: <<http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/AboutEDP/BusinessEnvironment/SpanishElectricitySystem/SistEl%c3%a9ctES.htm>>. Acesso em 26 de agosto de 2006.

HARRIS, C.E.; TULLBERG, J.N.. **Pathways of water loss from legumes and grass cut for conservation**. 1980.

KAZMIER, Leonard J.. **Estatística Aplicada a Economia e Administração**. São Paulo, Makron Books, 1982. 229 p.

LAZARO, Rubén A. Romero; ZULUAGA, Antônio H. Escobar; RENDÓN, Ramón A. Galhego. **Introducción a Optimización**. Universidad Tecnológica de Pereira, 2003. 393 p.

MACDONALD, A. D. ; CLARK, E. A.. **Water and quality loss during field drying of hay**. Brasília, 1987.

NÚCLEO DE ESTUDOS DE GENÉTICA. **Melhoramento Genético de Plantas Forrageiras**. Juiz de Fora, 2002. Disponível em: <<http://www.nucleoestudo.ufra.br/gen/gen.htm>> Acesso em 18 de julho de 2006.

PUACINI, Abelardo de Lima. **Introdução à Programação Linear**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1985. 252 p.

SOUZA, Adriano M.; JACOBI, Luciane F.; PEREIRA, João E. **Gráficos de Controle de Regressão Usando o Statistica**. Florianópolis: VisualBooks, 2005. 112 p.

SPIEGEL, Murray R.. **Estatística**. São Paulo, McGraw-Will, 1976. 590 p.

APÊNDICE A

Este apêndice apresenta as tabelas com os dados históricos da fábrica desidratadora de forragens referentes ao período de três anos, 2002, 2003 e 2004. A primeira tabela A1, corresponde aos dados originais do processo de empacotar com 420 amostras, juntamente com os dados do kWh calculado com a nova função encontrada por meio de regressão linear múltipla. A segunda tabela A2 corresponde aos dados originais do processo de granular com 357 amostras, juntamente com os dados do kWh calculado com a função encontrada por meio de regressão linear múltipla. A tabela A1 contém os dados da tabela A3, com a produção (Ton.) e o consumo (kWh) divididos pelo tempo (h). A tabela A2 contém os dados da tabela A4, com a produção (Ton.) e o consumo (kWh) divididos pelo tempo (h).

	D. O. Ton.	D. O. horas	D. O. kWh	D. C. F. M. kWh
1	118,302	13,63	1116	1310,2016
2	75,547	6,54	552	694,8005817
3	127,61	11,4	1032	1206,401536
4	172,53	15,7	1316	1654,540146
5	139,87	13,55	1096	1390,236526
6	240,55	23,82	2008	2434,501923
7	219,75	21,28	2040	2192,406036
8	160	14,78	1224	1547,144387
9	86	7,85	696	818,5780499
10	87	7,9	684	825,6731702
11	180	16,12	1544	1710,470733
12	212,656	20,43	1736	2110,863611
13	157,25	13,5	1172	1455,642063
14	155,25	13,9	1224	1472,957619
15	105	9,75	832	1013,246346
16	129,153	23,67	916	1985,640188
17	185,637	20,76	1632	2025,079892
18	45	4,46	412	443,242588
19	55,3	5,44	492	545,6227163
20	128,25	15,64	1320	1476,095189
21	149,73	18,22	1536	1723,393829
22	191,662	22,89	1724	2183,060439
23	100,1	14,52	1016	1294,483387
24	165,512	20,32	1644	1917,970911
25	121,596	13,57	1144	1319,414222
26	170,1	17,08	1580	1731,910908
27	160,3	19,87	1472	1869,056749
28	55,3	6,99	500	643,2906828
29	7,92	0,96	64	76,43845042
30	84,87	10,33	756	970,3894654
31	120,06	15,83	860	1455,761604
32	89,76	11,04	836	1034,416499
33	160,5	20,96	1644	1938,528292
34	184,824	23,85	1984	2216,578798
35	179,9	16,75	1532	1749,773581
36	200,228	20,87	1724	2089,56596
37	165,084	17,75	1548	1754,342858
38	150,28	15,3	1404	1541,569479
39	110,16	10,06	948	1053,133769
40	99,96	9,4	908	971,3118042
41	109,802	11,17	1052	1121,66449
42	45,238	5,14	428	487,0292707
43	85,15	8,05	792	827,8275086
44	44,85	4,26	400	430,0485886
45	179,222	16,78	1592	1748,98953
46	151,962	14,22	1208	1480,151678
47	119,68	11,27	1016	1166,929822
48	175	19,36	1524	1894,905585
49	210,12	22,11	2056	2206,71973
50	189,8	20,52	1844	2026,378233
51	150,15	16,73	1504	1631,163265
52	200,011	21,23	1860	2111,394168
53	157,95	19	1732	1804,966994
54	139,75	15,51	1356	1513,2659
55	29,9	3,44	308	319,4082008
56	100,1	10,85	964	1063,230847
57	173,41	22,76	1980	2102,873176
58	175,768	20,99	1920	2000,643886
59	154,7	15,37	1448	1563,41516
60	215,764	23,77	2232	2333,581959
61	205,017	22,5	2084	2211,165259
62	230,988	23,37	2260	2368,429009
63	243,959	23,94	2484	2455,510253
64	183,3	17,66	1716	1820,525568

65	150,15	14,03	1468	1461,031968
66	159,9	17,04	1704	1689,156129
67	159,9	14,79	1484	1547,380049
68	165,1	16,49	1636	1675,011366
69	81,9	7,81	736	799,8849695
70	204,75	20,65	2016	2093,540623
71	120,9	10,04	1116	1094,237904
72	46,15	4,64	412	459,1208962
73	42,25	4,24	388	418,5325511
74	229,423	20,71	2092	2194,64497
75	54,949	5,33	540	537,3069075
76	229,769	23,78	2380	2389,455367
77	154,7	18,27	1696	1746,148775
78	130,706	14,05	1380	1385,594551
79	195	20,26	1984	2030,506831
80	170,3	16,4	1660	1689,851934
81	206,587	21,78	1964	2171,989842
82	219,912	23,93	2444	2360,025768
83	205,41	20,87	2144	2110,00657
84	211,561	21,52	2188	2175,226974
85	180,999	17,64	1832	1810,188948
86	159,9	16,15	1696	1633,075813
87	208,372	23,79	2464	2305,684146
88	127,99	13,8	1412	1359,128281
89	154,7	16,78	1552	1652,261504
90	3,25	0,65	40	38,4838522
91	69,412	9,21	800	838,8417734
92	53,971	6,55	664	610,3232881
93	100,1	10,24	1020	1024,793777
94	100,1	10,64	1080	1049,998413
95	220,628	23,95	2508	2364,110291
96	219,803	23,9	2284	2357,705465
97	168,815	18,87	1868	1839,632922
98	180,05	21,61	2164	2056,601596
99	149,333	17,31	1764	1664,487298
100	49,77	7,28	664	639,7507344
101	55,25	6,81	644	631,7513694
102	61,514	7,19	668	680,4043768
103	137,232	15,73	1532	1517,196097
104	131,018	15,06	1560	1450,466955
105	44,85	4,91	452	471,006123
106	90,432	11,97	1120	1095,66801
107	15,148	2,67	224	212,6994115
108	29,7	2,91	280	285,2231492
109	70,2	7,77	748	751,21338
110	64,8	8,93	796	803,0063063
111	20,15	4,71	364	360,9736502
112	101,69	12,02	1180	1143,226229
113	74,749	11,99	1136	1035,066011
114	25,632	4,08	376	342,9003196
115	35,225	6,3	496	520,6260309
116	55,25	7,64	680	684,0509902
117	18,2	2,82	232	234,1898883
118	50,05	7,36	700	645,8961331
119	6,8	1,06	88	78,321724
120	40,171	5,36	476	480,9048332
121	35,75	4,57	436	413,6868618
122	55,25	7,62	736	682,7907583
123	3,9	1,07	48	67,51267197
124	40,6	7,3	584	604,8395283
125	25,9	4,5	352	370,4223248
126	39,9	5,26	420	473,5347036
127	20,15	3,94	264	312,4547249
128	100,1	10,52	1084	1042,437022
129	140	13,48	1240	1386,338505
130	149,8	13,41	1456	1420,584192

131	35,19	3,47	356	342,1651686
132	25,2	2,97	244	271,2534117
133	10,2	1,31	124	107,4860601
134	29,92	4,62	528	393,8407693
135	14,7	2,12	204	176,2758821
136	19,72	2,5	244	220,0218809
137	39,9	4,62	520	433,2072852
138	37,1	4,37	444	406,4096735
139	98	12,07	1228	1131,821453
140	119,68	13,53	1536	1309,336018
141	185,25	21	2136	2038,676137
142	150,15	16,88	1868	1640,615003
143	210,678	23,64	2556	2305,328518
144	141,7	17,88	1660	1670,295226
145	135,1	15,42	1616	1489,252743
146	109,9	10,9	1124	1105,037925
147	130,2	15,94	1680	1502,690521
148	80,08	9,34	1044	889,1136402
149	124,785	16,01	1536	1485,741645
150	100,1	9,36	872	969,3435762
151	4,9	0,58	64	40,58153291
152	125,3	15,48	1608	1454,37694
153	104,8	12,43	1304	1181,328503
154	134,93	14,86	1656	1453,29568
155	219,789	24	2664	2363,951401
156	213,254	23,79	2536	2324,941394
157	174,885	17,94	1960	1804,975503
158	125,76	13,54	1288	1333,948941
159	214,182	23,44	2652	2306,54787
160	222,146	24	2472	2373,248683
161	129,69	13,71	1476	1360,162957
162	229,343	23,96	2548	2399,117079
163	204,485	23,01	2400	2241,202675
164	216,377	23,99	2552	2349,862512
165	65	7	736	682,1828433
166	150,15	15,26	1564	1538,536225
167	193,7	22,42	2092	2161,483965
168	85,15	7,09	916	767,336381
169	227,794	24,01	2164	2396,157565
170	150,15	14,83	1640	1511,441241
171	235,968	24,1	2608	2434,071284
172	141,704	15,1	1580	1495,13878
173	170,3	17,54	1892	1761,685148
174	154,98	15,05	1816	1544,355923
175	174,85	17,67	1824	1787,824315
176	226,262	24,12	2392	2397,045804
177	227,364	23,81	2520	2381,859094
178	209,844	23,37	2356	2285,025641
179	124,8	13,5	1372	1327,641719
180	124,8	12,52	1280	1265,890359
181	124,8	12	1244	1233,124332
182	85,15	7,8	836	812,0746108
183	200,2	21,45	2168	2126,002236
184	139,86	13,29	1412	1373,814067
185	240,747	21,85	2392	2311,146163
186	149,94	16,42	1528	1610,801318
187	149,94	15,65	1560	1562,282392
188	229,326	24,07	2376	2405,981297
189	184,96	18,83	2160	1900,797067
190	230,048	23,95	2360	2401,267864
191	210,984	22,22	2316	2217,059088
192	135,32	15,63	1484	1503,352976
193	200,2	18,84	1964	1961,541983
194	209,95	21,19	2112	2148,078494
195	222,177	24	2444	2373,370964
196	210,891	23,99	2324	2328,222762

197	214,5	23,23	2428	2294,5698
198	150,15	15,54	1596	1556,179471
199	153,95	15,71	1616	1581,880696
200	224,479	23,98	2532	2381,191065
201	240,394	23,52	2528	2414,983098
202	219,368	23,26	2380	2315,662172
203	231,203	24,01	2496	2409,604504
204	109,85	11,36	1196	1133,82603
205	13,126	1,47	152	129,1096407
206	200,279	22,96	2476	2221,461358
207	170,28	19,4	2040	1878,807817
208	163,02	19,5	2024	1856,471611
209	172,92	19,4	1988	1889,221404
210	200,094	23,94	2292	2282,482977
211	115,874	12,73	1268	1243,913823
212	187,85	20,25	2160	2001,673249
213	140,22	18,64	1640	1712,346115
214	120,222	12,8	1340	1265,475498
215	199,771	21,39	2300	2120,529333
216	9,193	1,11	124	90,91158939
217	119,7	14,11	1404	1345,961632
218	190,205	23,98	2384	2245,995878
219	200,016	23,77	2388	2271,463332
220	144,9	16,78	1672	1613,605006
221	124,8	14,57	1488	1395,064121
222	99,84	11,56	1080	1106,943496
223	15,497	1,75	180	156,1053922
224	200,161	24,02	2468	2287,788189
225	188,216	23,91	2380	2233,739375
226	189,941	23,94	2428	2242,434056
227	186,88	22,79	2272	2157,896487
228	135,04	16,13	1644	1533,7543
229	176,949	22,13	2240	2077,135603
230	84,6	9,8	972	935,928296
231	59,895	8,02	664	726,3177863
232	100,2	14,8	1432	1312,521087
233	37,8	7,48	744	605,1369009
234	27,09	3,66	336	322,1865916
235	69,93	8,05	912	767,7915996
236	90,09	13,21	1268	1172,453351
237	90,09	12,47	1256	1125,824773
238	140,08	17,41	1820	1634,289622
239	79,95	10,72	1004	975,5568459
240	136,2	17,78	1844	1642,299093
241	135,2	17,93	1672	1647,806291
242	55,25	7,16	632	653,8054263
243	70,2	7,78	772	751,843496
244	35,1	4,12	388	382,7676943
245	29,031	5,55	512	448,9348525
246	59,8	12,02	1080	977,9894201
247	5,2	0,44	40	32,94327233
248	42,25	3,37	308	363,7124666
249	20,15	3,44	344	280,9489292
250	50,851	7,62	788	665,4387239
251	59,677	10,04	1008	852,7412908
252	35,03	5,5	568	469,4475724
253	10,454	1,91	164	146,2949282
254	72	11,16	1120	971,9228477
255	6	1,18	100	82,72748242
256	14,7	2,73	204	214,7129528
257	6	1,71	80	116,1236258
258	40,405	6,23	608	536,6479402
259	27,3	4,03	372	346,3292339
260	80,502	11,72	1136	1040,745824
261	60,993	11,52	1016	951,1894614
262	31,16	11,46	880	829,7312841

263	14,95	6,89	528	477,8273077
264	22,08	4,42	296	350,3132522
265	104,88	11,52	1220	1124,303518
266	80,24	9,43	920	895,4158099
267	34,68	4,34	428	394,9735373
268	30,34	3,45	364	321,7739146
269	150,28	17,44	1748	1676,414285
270	130,24	14,23	1236	1395,098482
271	10,2	1,61	136	126,3895375
272	99,96	11,98	1140	1133,88171
273	40,02	4,9	456	451,3238756
274	75,21	9,19	848	860,4519884
275	44,85	5,79	420	526,4563233
276	49,68	7,81	616	672,7918691
277	40,02	4,95	468	454,4744552
278	9,66	1,51	104	117,9583264
279	15,18	2,46	248	199,5932026
280	104,88	11,36	1140	1114,221663
281	41,48	4,49	464	431,2481526
282	17,94	1,95	200	178,3442233
283	35,19	3,68	384	355,3976028
284	65,28	7,6	792	721,0942694
285	10,2	1,16	112	98,03432141
286	14,96	2,1	204	176,0412308
287	55,25	6,53	556	614,1081238
288	144,95	16,6	1712	1602,460146
289	109,85	13,44	1280	1264,89014
290	170,158	21,13	1840	1987,336636
291	107,25	12,94	1356	1223,128539
292	139,75	17,48	1568	1637,398735
293	199,745	24,01	2200	2285,517144
294	130	15,47	1484	1472,286165
295	89,7	10,68	1120	1011,495654
296	130	14,2	1508	1392,261444
297	124,8	13,74	1408	1342,764501
298	221,519	24	2488	2370,775456
299	224,147	23,5	2456	2349,635914
300	85,15	9,06	864	891,4692158
301	139,75	14,63	1448	1457,8157
302	74,75	7,88	764	776,0923151
303	219,129	23,81	2300	2349,375802
304	204,75	22,35	2084	2200,660328
305	185,25	20,16	2008	1985,7464
306	144,95	15,33	1572	1522,435425
307	219,596	23,96	2484	2360,669641
308	223,973	24	2488	2380,455359
309	221,077	24	2396	2369,031969
310	130	14,43	1308	1406,75411
311	165,1	18,2	1836	1782,761187
312	228,375	24,04	2372	2400,339691
313	215,497	22,56	2392	2256,284741
314	221,382	23,76	2360	2355,112272
315	110,08	11,95	1208	1171,910114
316	135,04	14,32	1472	1419,70332
317	190,49	20,49	2092	2027,209618
318	144,9	15,39	1460	1526,018894
319	199,71	21,32	2120	2115,877904
320	134,82	14,46	1476	1427,657144
321	209,79	22,4	2288	2223,691393
322	129,78	13,83	1396	1368,079356
323	110,25	11,84	1140	1165,64941
324	94,9	10,25	960	1004,912281
325	139,75	15,24	1480	1496,252771
326	149,86	15,79	1588	1570,788452
327	99,695	10,78	1056	1057,222497
328	45,085	4,88	472	470,0427423

329	199,859	21,62	2164	2135,369118
330	214,89	23,35	2288	2303,669562
331	232,054	23,7	2276	2393,427715
332	225,881	23,95	2340	2384,830963
333	225,861	23,97	2344	2386,012304
334	219,282	23,95	2384	2358,800939
335	70,2	7,54	676	736,720714
336	94,9	11,42	916	1078,635843
337	74,75	9,23	724	861,1579634
338	200,043	23,58	2000	2259,597633
339	225,608	23,91	2516	2381,23364
340	225,9	23,83	2532	2377,344518
341	214,873	23,39	2372	2306,122968
342	79,95	9,18	952	878,5189953
343	90	11,04	1128	1035,363189
344	220	24,08	2552	2369,824626
345	144,95	15,71	1660	1546,37983
346	105,3	11,62	1156	1132,261384
347	144,95	16,09	1656	1570,324235
348	184,103	20,66	2136	2012,727808
349	140,16	15,26	1632	1499,130264
350	189,8	21,45	2212	2084,979013
351	195,445	21,49	2228	2109,766409
352	135,2	13,92	1436	1395,12981
353	195	21,48	2048	2107,380972
354	175,197	18,34	1592	1831,410837
355	40,3	4,53	396	429,1140582
356	85,15	9,09	852	893,3595636
357	220,562	24,21	2376	2380,232965
358	174,85	19,6	1972	1909,436686
359	209,92	23,48	2376	2292,256702
360	144,95	15,79	1480	1551,420757
361	150,819	15,56	1632	1560,0786
362	208,583	23,67	2448	2298,955053
363	200,226	23,53	2404	2257,168904
364	200,557	24	2436	2288,089995
365	205,432	24,08	2396	2312,360558
366	89,7	10,19	996	980,619974
367	92,95	11,22	1000	1058,34167
368	195,348	22,8	2348	2191,928973
369	199,693	23,77	2528	2270,189246
370	160	18,75	1932	1797,300405
371	100	12,8	1332	1185,708996
372	195	22,96	2244	2200,638127
373	170	19,79	1884	1902,277866
374	5,224	0,69	60	48,79083913
375	181,35	21,09	2124	2028,963471
376	120,32	14,81	1520	1392,515361
377	144,9	16,88	1708	1619,906165
378	149,94	17,81	1776	1698,38743
379	149,94	17,83	1768	1699,647661
380	109,85	13,39	1376	1261,739561
381	24,385	2,99	272	269,2988429
382	180,284	23,65	1948	2186,068265
383	98,28	16,53	992	1413,957622
384	175,14	21,63	1676	2038,494133
385	60	10,89	832	907,57523
386	152,1	18,53	1720	1752,275983
387	105,3	13,39	1324	1243,791901
388	120,25	15,18	1568	1415,553532
389	140,494	17,7	1556	1654,196023
390	155,377	20,4	1620	1883,033919
391	144,95	18,03	1800	1692,566722
392	59,8	7	688	661,6712318
393	185,25	21,7	1988	2082,784251
394	150,479	17,22	1564	1663,336698

395	124,15	14,95	1340	1416,444575
396	135,2	16,34	1452	1547,617861
397	95,548	11,94	1136	1113,957933
398	16,173	2,09	180	180,1958427
399	120,25	14,18	1396	1352,541941
400	144,175	17,63	1756	1664,305066
401	151,761	18,73	1836	1763,541102
402	170,68	19,11	1796	1862,112272
403	144,84	15,57	1560	1537,124308
404	34,68	3,87	328	365,3580894
405	16,618	1,83	180	165,5681496
406	145	15,72	1616	1547,207173
407	104,72	11,5	1176	1122,412159
408	110,967	12,17	1244	1189,271471
409	65,778	8	740	748,2632872
410	75	7,77	840	770,1471753
411	40,12	4,31	452	414,5414908
412	4,9	0,83	60	56,33443073
413	29,92	3,02	340	293,0222232
414	29,92	5,47	328	447,4006219
415	45,018	5,64	556	517,6672674
416	20	2,27	232	206,6336863
417	10,35	1,06	120	92,32484338
418	40	4,64	484	434,8619711
419	13,11	1,42	148	125,8959485
420	29,92	3,27	344	308,775121
SOMA DOS kWh:			572828	572828

D.O. – Dados originais.

D. C. F. M – Dados calculados com a função obtida por meio de regressão linear múltipla.

	D. O Ton.	D. O horas	D. O kWh	D. C. F. M. kWh
1	57,774	12,08	5108	5008,857216
2	63,033	12,21	5050	5150,798733
3	50,157	7,61	3464	3524,700768
4	49,913	7,98	3504	3630,402837
5	18,696	2,7	1470	1441,606143
6	81,819	11,61	5386	5339,999467
7	13,98	2,1	964	1169,964306
8	15,98	1,99	856	1176,334251
9	55,717	8,1	3636	3780,044946
10	65,373	9,49	4188	4384,45731
11	90,502	10,07	5686	5050,398339
12	82,214	12,13	4200	5503,023322
13	59,743	9,06	6600	4145,657269
14	54,815	13,75	3438	5449,517885
15	93,307	23,05	6610	8981,389297
16	60,049	10,29	4280	4518,950743
17	185,233	23,84	14230	11019,83814
18	160,805	23,67	10900	10490,07385
19	41,723	11,24	2530	4443,284323
20	178,58	23,91	11232	10910,28464
21	134,905	19,79	8828	8823,5937
22	139,285	20,45	8572	9106,563772
23	109,697	18,4	8968	7914,22756
24	116,806	15,88	7658	7301,12228
25	7,708	1,52	440	873,7836527
26	46,568	5,92	3294	2949,67039
27	4,497	0,82	546	601,7916013
28	39,94	7,84	3174	3393,040004
29	40,107	6,56	2950	3014,090804
30	29,633	4,54	2068	2205,512762
31	32,119	4,7	2170	2302,037855
32	52,026	8,13	3386	3716,627778
33	63,91	9,85	4154	4463,270307
34	25,481	4,1	1820	1992,708187
35	32,385	5,95	2184	2680,519231
36	44,336	6,93	3338	3207,502379
37	41,196	7,89	3086	3432,599092
38	89,844	14,1	7052	6240,903734
39	99,368	13,71	7012	6311,19772
40	50,754	7,7	3478	3563,282248
41	16,05	2,27	1082	1261,318323
42	19,082	2,77	1460	1470,07795
43	40,481	5,26	2878	2633,228347
44	15,887	2,01	1020	1180,482894
45	24,161	2,6	1350	1518,906195
46	71,15	10,36	4284	4757,52927
47	36,167	4,79	2666	2408,288798
48	3,401	1,7	344	843,0794112
49	21,437	2,66	1566	1483,408966
50	50,944	7,24	3876	3429,646197
51	6,269	1,23	558	758,9692105
52	49,142	8,49	3794	3767,576879
53	70,033	10,07	4452	4649,028814
54	60,143	9,89	4276	4401,349005
55	55,199	8,32	3822	3835,582387
56	18,187	2,85	1274	1476,417195
57	61,068	9,43	4332	4282,125315
58	46,151	6,67	3086	3165,452866
59	45,788	6,79	3346	3194,16841
60	45,794	7,01	3174	3259,980786
61	37,818	5,63	2594	2691,497083
62	6,186	0,79	454	625,9522453
63	93,43	14,08	6364	6305,248117
64	90,543	13,14	6538	5967,942299

65	88,708	13,06	5282	5908,071429
66	24,543	3,85	2384	1899,662175
67	15,298	2,05	1066	1180,877892
68	43,495	6,21	3240	2976,010588
69	49,432	7,31	3804	3420,90078
70	24,86	3,35	2018	1756,571929
71	21,317	4,48	958	2024,530459
72	140,922	23,66	11120	10097,20888
73	58,743	10,21	4670	4469,452852
74	10,172	1,79	840	1002,724717
75	25,038	4,26	1720	2031,799534
76	19,945	2,42	1536	1382,485885
77	120,112	19,84	7570	8548,453511
78	94,983	16,03	6940	6917,994496
79	79,866	17,08	7190	6935,113483
80	86,902	18,87	8648	7607,596126
81	25,306	6,59	2640	2732,821498
82	66,07	14,28	5382	5828,477839
83	70,089	14,88	6670	6086,452444
84	35,3	7,84	3486	3302,055853
85	37,116	7,28	3646	3170,442235
86	64,912	10,12	4488	4563,54352
87	33,792	4,68	2510	2328,870885
88	49,625	8,19	3702	3687,464144
89	24,797	4,3	1824	2039,018344
90	90,312	15,07	7134	6539,734592
91	25,229	4,85	2266	2211,726091
92	75,522	14,15	6226	5974,999221
93	14,632	2,62	1286	1338,027586
94	14,372	3,02	1714	1452,374288
95	41,489	7,18	3970	3226,329638
96	30,049	5,69	1836	2557,074199
97	30,466	4,33	2094	2159,138171
98	81,601	13,13	6068	5789,615597
99	50,105	8,1	4240	3670,001184
100	100,898	14,72	6342	6642,797463
101	47,308	7,31	3782	3379,252001
102	45,576	7,48	3782	3396,053918
103	8,827	1,31	564	833,017136
104	6,232	0,9	424	659,7016051
105	51,802	8,13	4222	3712,23544
106	13,236	4,31	2196	1815,308827
107	52,301	8,7	3756	3892,229214
108	30,114	5,27	2418	2432,931562
109	135,172	18,8	8280	8533,202955
110	139,537	18,09	7946	8406,779937
111	89,9	12,39	5456	5731,37465
112	183,983	23,46	10260	10881,85462
113	70,322	10,49	4240	4780,112915
114	71,778	10,49	5104	4808,663114
115	155,51	20,82	9394	9535,200752
116	166,634	21,71	9316	10019,09243
117	179,51	23,77	10280	10886,71495
118	168,017	22,09	9440	10159,6839
119	180,171	23,87	10170	10929,53751
120	165,811	22,51	9140	10241,84441
121	105,038	14,19	6370	6565,712727
122	10,273	1,2	660	828,523887
123	134,871	20,76	9586	9112,581014
124	169,874	22,63	8090	10357,34785
125	182,231	23,9	10320	10978,88971
126	180,144	23,96	10488	10955,88319
127	160,661	21,27	9480	9770,580496
128	180,574	23,93	10720	10955,35654
129	176,828	23,99	10580	10899,81927
130	118,932	17,77	8852	7907,187674

131	154,526	21,84	9896	9820,490464
132	159,426	23,06	10388	10280,87997
133	155,397	21,56	9636	9753,958135
134	158,956	19,14	9990	9101,103374
135	163,521	20,04	9916	9459,368018
136	79,884	13,92	7210	5991,851319
137	140,515	20,28	8520	9079,918311
138	80,67	11,86	4702	5392,122219
139	85,103	10,51	5174	5075,920667
140	24,753	2,97	1734	1641,001098
141	51,945	6,6	3242	3258,162537
142	36,456	4,49	2310	2324,371985
143	50,292	7,99	2984	3640,82064
144	80,144	11,78	5296	5357,919077
145	42,097	5,84	2730	2838,11111
146	109,91	14,78	7056	6837,427389
147	45,22	6,13	2964	2985,946525
148	68,422	14,64	6528	5982,097848
149	41,473	5,15	2326	2619,832769
150	61,912	8,12	4162	3907,492801
151	84,735	11,63	5456	5403,150547
152	65,269	7,5	3574	3788,179375
153	45,007	6,05	2780	2957,880891
154	15,435	1,97	832	1159,675288
155	5,005	0,54	388	528,1413309
156	70,665	9,75	4874	4565,865522
157	38,659	5,37	2894	2630,348742
158	25,399	3,64	1666	1853,738583
159	12,34	1,56	738	976,5554299
160	94,844	13,54	5424	6171,724068
161	66,679	9,16	4130	4311,524126
162	45,135	6,42	3068	3070,877379
163	64,16	8,96	4064	4202,407452
164	39,006	6,32	2676	2920,834705
165	14,196	1,47	778	986,0739763
166	80,65	11,49	5170	5281,243465
167	45,519	6,34	2806	3054,518112
168	115,484	16,28	7514	7394,644592
169	15,952	1,97	1022	1169,812961
170	62,083	8,64	4248	4066,124318
171	10,251	2,14	768	1108,788133
172	52,997	7,57	3292	3568,444848
173	49,776	8,35	3280	3738,203032
174	34,705	5,13	2260	2481,149156
175	41,904	8,36	3256	3586,829837
176	12,561	1,92	480	1088,389399
177	32,12	5,1	2316	2421,502416
178	11,217	1,85	798	1041,132502
179	40,949	5,59	2704	2740,947282
180	10,009	1,5	990	912,9309163
181	55,499	7,8	3864	3686,186546
182	72,473	9,88	4914	4640,137576
183	9,379	1,49	720	897,591341
184	16,737	2,57	1256	1364,373182
185	27,097	4,37	1822	2105,021113
186	4,91	0,87	380	624,8205941
187	22,738	3,77	1450	1840,379566
188	61,055	9,95	4116	4437,148839
189	26,41	4,73	2078	2199,050425
190	55,206	9,56	3982	4205,998998
191	3,783	0,88	460	605,7077656
192	8,428	1,31	638	825,1932834
193	44,227	7,19	3156	3283,004254
194	83,101	14,24	6548	6150,488318
195	60,249	8,37	4416	3949,536705
196	28,829	7	2668	2924,333859

197	34,141	10,92	4616	4199,055553
198	80,674	14,78	5780	6264,148802
199	9,438	1,72	820	967,4290988
200	112,891	20,28	8674	8538,248872
201	70,644	16	6588	6431,781112
202	39,96	7,73	3322	3360,584816
203	65,744	11,61	5474	5024,790365
204	37,586	6,73	3410	3015,421493
205	15,204	2,93	1296	1441,813573
206	7,705	1,5	570	867,7525791
207	11,844	1,82	956	1044,468757
208	34,323	6,1	2958	2763,312658
209	65,096	11,12	5278	4865,763891
210	54,96	10,24	4498	4404,231688
211	54,462	10,84	4742	4573,634006
212	15,201	3,01	1190	1465,643737
213	44,406	8,88	3720	3791,169125
214	30,09	6,16	2370	2698,225972
215	19,444	7,48	3732	2883,64059
216	49,81	9,27	4556	4013,593115
217	25,788	4,67	2090	2168,9371
218	19,693	3,87	1620	1810,532454
219	34,864	6,58	2720	2917,254882
220	50,327	10	3756	4241,717826
221	60,401	10,43	5150	4567,658722
222	71,113	11,19	5544	5004,652025
223	88,641	12,52	7270	5745,506965
224	94,784	14,34	7328	6409,437453
225	15,354	2,19	1494	1223,78171
226	32,561	5,67	2768	2600,358888
227	15,916	6,08	3002	2396,403929
228	23,168	10,12	4094	3744,999896
229	17,092	8,5	4322	3142,105664
230	15,2	4,41	1784	1883,68146
231	34,953	10,99	3930	4235,880646
232	20,933	6,98	2880	2763,531685
233	15,429	4,47	2060	1906,088584
234	20,285	5,05	2512	2174,503385
235	18,837	5,18	2076	2184,929664
236	11,524	5,06	1592	2005,698097
237	34,991	6,15	4084	2791,341858
238	25,12	4,09	1950	1982,643339
239	39,76	6	2590	2840,063668
240	65,32	10,79	4902	4771,614145
241	79,351	13,41	5906	5829,107593
242	40	6,64	3062	3035,881668
243	54,51	10,33	3874	4422,282908
244	145,698	23,31	9820	10086,34547
245	80,265	11,6	5314	5306,541496
246	30,04	4,01	1930	2055,228923
247	74,98	10,68	4684	4928,186374
248	54,79	8,08	3102	3755,895477
249	125,15	18,87	7650	8357,587898
250	105	15,25	6464	6881,49672
251	115,32	16,17	7134	7358,581411
252	124,98	19,21	7872	8455,782636
253	150,34	22,84	9286	10037,02102
254	99,82	14,11	6332	6439,505783
255	56,256	18,06	8532	6764,79331
256	77,04	10,78	4740	4998,441437
257	125,133	17,76	7736	8025,79481
258	149,985	19,47	9386	9023,73623
259	175,893	22,57	9750	10457,4556
260	165,66	20,97	9626	9779,02044
261	130,037	16,9	7608	7865,148999
262	179,8	23,09	10708	10689,34504
263	170,04	22,33	9776	10271,01918

264	180	23,73	10514	10884,3787
265	190	22,4	10026	10683,31076
266	200	24,17	11870	11407,94121
267	135,396	16,08	8254	7725,369621
268	56,908	6,89	3238	3442,077873
269	190,083	23,06	11276	10882,02245
270	130	16,15	7012	7640,464194
271	72,472	9,34	4960	4478,867283
272	21,842	2,82	1490	1539,128452
273	85,121	11,57	5664	5392,802745
274	55,395	7,37	3432	3555,743923
275	59,986	8,12	3986	3869,726535
276	100,701	13,38	6070	6238,79397
277	110,154	14,23	6876	6677,975092
278	76,469	9,96	4662	4742,382745
279	67,578	8,74	4642	4203,735106
280	109,85	14,85	7316	6857,153737
281	66,791	9,55	4542	4430,179123
282	54,807	7,79	3456	3669,631234
283	15,715	2,09	1026	1200,999196
284	24,593	3,76	2302	1873,767494
285	60,314	8,59	4248	4016,505991
286	65	9,21	4412	4293,531816
287	45,735	5,9	2974	2927,364134
288	89,039	11,6	5472	5478,58782
289	71,101	9,67	4398	4550,525904
290	59,735	8,23	3860	3897,652124
291	13,41	1,86	1060	1087,120403
292	66,029	8,81	4444	4194,264168
293	12,797	1,57	882	988,5027083
294	109,608	14,74	6922	6819,561081
295	78,55	10,12	4914	4830,966333
296	96,498	12,33	6530	5842,835802
297	99,965	13,43	6760	6239,29262
298	70,25	9,29	4830	4420,366236
299	60,14	8,29	4182	3923,510372
300	89,995	11,93	6054	5595,875777
301	85,009	11,36	6158	5327,897976
302	66,083	8,64	4894	4144,558931
303	96,276	13,23	6414	6107,233822
304	93,805	11,25	5856	5467,528328
305	23,622	4,01	1568	1929,380586
306	60,05	8,01	4130	3838,134127
307	64,7	8,99	4244	4221,954496
308	59,534	7,77	4044	3756,34909
309	12,502	1,73	630	1030,496136
310	64,646	8,95	4598	4208,951134
311	24,958	3,6	1698	1833,146671
312	73,528	10,06	4614	4714,574934
313	16,413	1,85	942	1143,019065
314	69,755	9,88	4444	4586,841257
315	108,82	15,21	7378	6944,457281
316	21,552	2,86	1658	1545,386437
317	24,928	3,44	1660	1784,780431
318	13,754	1,63	820	1025,184932
319	53,351	8,53	4478	3862,054196
320	114,089	13,8	7004	6626,73182
321	19,671	2,83	1400	1499,544189
322	40	5,21	2468	2608,865965
323	80	10,45	4928	4957,940966
324	15,352	1,54	986	1029,644446
325	69,556	8,53	4500	4179,812422
326	50,091	6,9	3252	3311,391807
327	45,59	5,97	3224	2945,423746
328	49,41	6,33	3522	3127,829258
329	54,949	6,97	3884	3427,553511

330	39,696	5,54	2728	2701,44702
331	4,86	0,84	564	614,88179
332	9,789	1,38	640	872,7835271
333	10,472	1,79	970	1008,607313
334	79,738	10,77	5076	5048,35946
335	69,468	9,12	5272	4354,268165
336	24,425	3,31	1860	1736,097669
337	9,018	1,47	680	884,5403695
338	7,911	1,02	390	728,4580195
339	43,825	6,28	3358	3003,38431
340	49,298	6,88	2924	3289,869898
341	66,085	8,36	4560	4060,986682
342	78,986	9,83	5022	4752,918116
343	20,852	2,65	1277	1468,95178
344	50,114	6,04	2870	3055,03616
345	29,856	4,23	2118	2117,315654
346	40,379	5,4	3150	2673,033997
347	50,096	7,13	3590	3380,170698
348	45,459	6,9	2952	3220,564525
349	30	4,05	2098	2066,389072
350	89,206	11,74	5920	5523,668198
351	55	7,35	3616	3542,026257
352	104,523	15,52	6360	6952,768735
353	60	9,36	3960	4240,280406
354	50	7,11	3412	3372,316019
355	51	7	3480	3359,077311
356	75	11,78	5230	5257,052164
357	39,574	6,63	2836	3024,542258
SOMA DOS kWh:				1554629

D. O.- Dados originais.

D. C. F. M. - Dados calculados com a função obtida por meio de regressão linear múltipla.

A3 – DADOS DO PROCESSO DE EMPACOTAR DIVIDIDOS PELA HORA 93

	Ton/hora	kWh/hora
1	2,170	77
2	2,719	77
3	4,278	77
4	4,975	90
5	4,995	67
6	5,053	99
7	5,085	85
8	5,114	67
9	5,231	92
10	5,295	88
11	5,385	75
12	5,473	86
13	5,510	76
14	5,562	80
15	5,591	79
16	5,673	84
17	5,756	78
18	5,858	100
19	5,904	72
20	5,944	100
21	6,171	101
22	6,234	95
23	6,282	92
24	6,335	84
25	6,361	79
26	6,369	103
27	6,397	69
28	6,415	83
29	6,452	100
30	6,454	82
31	6,486	98
32	6,673	103
33	6,770	97
34	6,774	92
35	6,800	95
36	6,820	96
37	6,837	91
38	6,869	97
39	6,894	70
40	6,934	96
41	7,124	97
42	7,225	101
43	7,232	89
44	7,251	97
45	7,256	89
46	7,402	92
47	7,458	94
48	7,468	83
49	7,495	89
50	7,523	88
51	7,537	87
52	7,540	93
53	7,555	94
54	7,571	87
55	7,586	80
56	7,617	79
57	7,619	87
58	7,623	82
59	7,657	78
60	7,660	104
61	7,716	88
62	7,738	86
63	7,746	73
64	7,749	83
65	7,786	95
66	7,794	96
67	7,812	104

68	7,823	95
69	7,864	99
70	7,872	100
71	7,888	98
72	7,911	72
73	7,922	103
74	7,925	93
75	7,932	99
76	7,934	101
77	7,938	88
78	7,982	99
79	7,991	99
80	7,995	90
81	7,996	101
82	8,002	95
83	8,039	100
84	8,046	105
85	8,053	87
86	8,067	74
87	8,085	95
88	8,094	104
89	8,097	77
90	8,099	78
91	8,103	98
92	8,113	95
93	8,119	102
94	8,124	103
95	8,130	76
96	8,145	81
97	8,152	102
98	8,156	91
99	8,167	93
100	8,168	105
101	8,173	95
102	8,178	100
103	8,184	92
104	8,200	100
105	8,200	84
106	8,204	103
107	8,208	93
108	8,216	73
109	8,218	84
110	8,222	93
111	8,240	101
112	8,274	89
113	8,282	112
114	8,284	89
115	8,288	105
116	8,304	90
117	8,310	80
118	8,313	91
119	8,319	92
120	8,332	100
121	8,333	103
122	8,344	95
123	8,357	101
124	8,358	96
125	8,360	104
126	8,372	102
127	8,373	75
128	8,374	91
129	8,399	105
130	8,401	106
131	8,403	96
132	8,409	99
133	8,415	100
134	8,419	100
135	8,431	105

136	8,448	110
137	8,460	98
138	8,461	85
139	8,467	93
140	8,480	98
141	8,483	100
142	8,484	85
143	8,485	82
144	8,490	102
145	8,493	98
146	8,509	98
147	8,509	102
148	8,519	94
149	8,531	100
150	8,533	103
151	8,537	92
152	8,543	98
153	8,555	93
154	8,566	102
155	8,568	103
156	8,574	112
157	8,584	101
158	8,589	104
159	8,590	95
160	8,599	101
161	8,617	100
162	8,621	104
163	8,627	102
164	8,633	99
165	8,635	100
166	8,636	113
167	8,637	93
168	8,640	93
169	8,658	95
170	8,680	82
171	8,687	113
172	8,692	90
173	8,700	104
174	8,709	104
175	8,723	108
176	8,724	97
177	8,732	103
178	8,739	91
179	8,759	104
180	8,761	105
181	8,777	105
182	8,791	97
183	8,793	97
184	8,794	106
185	8,801	83
186	8,803	98
187	8,811	102
188	8,812	103
189	8,821	102
190	8,846	114
191	8,848	103
192	8,855	103
193	8,887	104
194	8,895	111
195	8,896	87
196	8,911	103
197	8,912	108
198	8,913	102
199	8,921	101
200	8,929	103
201	8,931	94
202	8,940	101
203	8,942	79

204	8,946	99
205	8,961	84
206	8,961	85
207	8,964	107
208	8,975	90
209	8,979	101
210	9,009	103
211	9,009	91
212	9,010	87
213	9,019	106
214	9,023	99
215	9,035	96
216	9,062	99
217	9,065	79
218	9,071	101
219	9,077	94
220	9,078	95
221	9,080	111
222	9,081	98
223	9,083	102
224	9,095	104
225	9,102	100
226	9,104	106
227	9,106	102
228	9,110	98
229	9,112	93
230	9,118	102
231	9,132	93
232	9,134	92
233	9,136	106
234	9,137	113
235	9,150	105
236	9,152	87
237	9,155	106
238	9,156	100
239	9,158	111
240	9,161	93
241	9,165	104
242	9,170	97
243	9,180	94
244	9,185	107
245	9,187	101
246	9,189	100
247	9,190	102
248	9,197	96
249	9,200	103
250	9,203	98
251	9,203	97
252	9,212	100
253	9,212	101
254	9,212	105
255	9,219	92
256	9,224	103
257	9,226	89
258	9,227	106
259	9,230	104
260	9,232	104
261	9,232	100
262	9,234	105
263	9,238	103
264	9,239	97
265	9,244	100
266	9,244	102
267	9,248	98
268	9,250	90
269	9,256	103
270	9,257	102
271	9,259	94

272	9,275	102
273	9,277	107
274	9,286	105
275	9,288	95
276	9,297	102
277	9,301	87
278	9,303	100
279	9,303	98
280	9,309	105
281	9,310	90
282	9,312	96
283	9,317	99
284	9,324	102
285	9,332	104
286	9,333	101
287	9,339	108
288	9,361	106
289	9,366	102
290	9,367	99
291	9,367	94
292	9,381	99
293	9,384	100
294	9,384	101
295	9,384	105
296	9,392	105
297	9,398	95
298	9,408	102
299	9,415	95
300	9,421	88
301	9,423	98
302	9,430	103
303	9,431	102
304	9,431	98
305	9,436	105
306	9,455	103
307	9,460	108
308	9,480	106
309	9,485	90
310	9,486	97
311	9,487	90
312	9,491	101
313	9,495	104
314	9,500	99
315	9,503	93
316	9,515	103
317	9,527	99
318	9,538	105
319	9,549	106
320	9,552	106
321	9,552	99
322	9,553	87
323	9,563	104
324	9,572	106
325	9,581	100
326	9,594	83
327	9,605	99
328	9,625	98
329	9,629	104
330	9,653	108
331	9,662	103
332	9,662	100
333	9,670	105
334	9,693	105
335	9,709	108
336	9,713	103
337	9,748	109
338	9,764	113
339	9,775	100

340	9,791	108
341	9,791	96
342	9,799	103
343	9,822	92
344	9,823	115
345	9,830	94
346	9,831	102
347	9,839	102
348	9,842	103
349	9,884	97
350	9,895	103
351	9,901	105
352	9,907	113
353	9,908	100
354	9,915	98
355	9,946	89
356	9,959	93
357	9,965	92
358	9,968	102
359	10,012	99
360	10,065	94
361	10,083	103
362	10,090	92
363	10,099	84
364	10,125	111
365	10,141	103
366	10,165	90
367	10,190	104
368	10,206	96
369	10,221	107
370	10,261	104
371	10,309	101
372	10,323	81
373	10,327	96
374	10,379	97
375	10,384	101
376	10,386	92
377	10,400	104
378	10,409	85
379	10,487	94
380	10,524	106
381	10,528	94
382	10,578	98
383	10,619	90
384	10,626	104
385	10,634	97
386	10,681	95
387	10,686	85
388	10,694	93
389	10,702	105
390	10,740	91
391	10,769	85
392	10,811	100
393	10,825	83
394	10,917	107
395	10,950	94
396	10,955	89
397	10,989	84
398	11,013	87
399	11,018	109
400	11,078	101
401	11,166	96
402	11,169	88
403	11,171	109
404	11,194	91
405	11,552	84
406	11,648	87
407	11,818	91

408	12,042	111
409	12,537	91

	Ton/hora	kWh/hora
1	2,277	315
2	2,289	405
3	2,999	413
4	3,126	423
5	3,18	358
6	3,447	405
7	3,452	461
8	3,636	401
9	3,84	401
10	4,118	381
11	4,415	412
12	4,503	445
13	4,605	458
14	4,627	377
15	4,674	446
16	4,676	421
17	4,71	448
18	4,783	423
19	4,79	359
20	4,885	385
21	5,001	419
22	5,012	389
23	5,024	437
24	5,033	376
25	5,05	395
26	5,089	419
27	5,094	405
28	5,097	454
29	5,098	501
30	5,137	380
31	5,162	414
32	5,169	430
33	5,189	442
34	5,202	467
35	5,221	391
36	5,277	375
37	5,281	323
38	5,298	413
39	5,337	440
40	5,367	439
41	5,373	491
42	5,443	367
43	5,458	391
44	5,487	477
45	5,522	448
46	5,567	428
47	5,584	439
48	5,585	491
49	5,585	507
50	5,627	485
51	5,644	437
52	5,663	471
53	5,683	469
54	5,714	459
55	5,739	518
56	5,743	488
57	5,753	457
58	5,767	424
59	5,775	417
60	5,778	553
61	5,788	447
62	5,791	494
63	5,836	416
64	5,836	460
65	5,85	542
66	5,854	475
67	5,877	404

68	5,891	391
69	5,917	440
70	5,925	433
71	5,956	470
72	5,961	393
73	5,962	487
74	5,969	428
75	5,993	473
76	6,012	432
77	6,024	461
78	6,031	385
79	6,054	454
80	6,054	382
81	6,059	452
82	6,063	431
83	6,081	432
84	6,093	506
85	6,114	450
86	6,135	463
87	6,136	414
88	6,142	477
89	6,151	439
90	6,172	423
91	6,186	523
92	6,201	417
93	6,215	462
94	6,215	444
95	6,25	421
96	6,255	525
97	6,255	439
98	6,294	373
99	6,295	483
100	6,298	454
101	6,355	495
102	6,367	444
103	6,372	519
104	6,372	500
105	6,381	447
106	6,398	482
107	6,399	416
108	6,41	423
109	6,414	443
110	6,434	487
111	6,472	517
112	6,476	459
113	6,488	422
114	6,497	462
115	6,506	410
116	6,508	525
117	6,512	489
118	6,527	456
119	6,533	453
120	6,582	407
121	6,588	428
122	6,591	455
123	6,591	452
124	6,61	511
125	6,627	432
126	6,632	405
127	6,634	459
128	6,636	452
129	6,657	459
130	6,693	498
131	6,704	404
132	6,717	461
133	6,735	410
134	6,738	431
135	6,743	493

136	6,762	520
137	6,765	441
138	6,778	346
139	6,781	384
140	6,792	404
141	6,794	460
142	6,802	396
143	6,803	450
144	6,811	419
145	6,817	446
146	6,834	462
147	6,843	487
148	6,854	431
149	6,868	414
150	6,879	449
151	6,885	424
152	6,889	441
153	6,889	527
154	6,891	498
155	6,914	450
156	6,919	463
157	6,919	458
158	6,924	544
159	6,924	471
160	6,929	420
161	6,933	472
162	6,951	495
163	6,955	442
164	6,978	458
165	6,979	535
166	6,994	476
167	7,001	435
168	7,004	522
169	7,005	401
170	7,019	450
171	7,021	439
172	7,021	495
173	7,026	504
174	7,03	478
175	7,032	480
176	7,036	444
177	7,036	484
178	7,036	535
179	7,046	436
180	7,047	464
181	7,058	479
182	7,058	501
183	7,06	450
184	7,07	477
185	7,074	449
186	7,075	453
187	7,08	581
188	7,093	464
189	7,094	462
190	7,115	495
191	7,132	441
192	7,147	440
193	7,155	485
194	7,161	454
195	7,165	492
196	7,165	425
197	7,18	443
198	7,186	492
199	7,19	440
200	7,197	472
201	7,198	528
202	7,199	539
203	7,208	447

204	7,208	467
205	7,21	570
206	7,221	536
207	7,223	514
208	7,227	364
209	7,247	483
210	7,248	500
211	7,248	511
212	7,255	504
213	7,256	440
214	7,258	469
215	7,26	471
216	7,277	485
217	7,279	451
218	7,286	497
219	7,286	469
220	7,309	459
221	7,325	484
222	7,335	497
223	7,353	455
224	7,356	482
225	7,357	490
226	7,366	406
227	7,371	441
228	7,377	484
229	7,379	562
230	7,387	491
231	7,397	493
232	7,402	449
233	7,404	471
234	7,407	518
235	7,421	602
236	7,436	470
237	7,436	477
238	7,439	460
239	7,443	503
240	7,462	520
241	7,469	470
242	7,469	451
243	7,478	583
244	7,483	492
245	7,483	542
246	7,491	481
247	7,495	504
248	7,497	516
249	7,507	357
250	7,516	466
251	7,519	438
252	7,519	491
253	7,526	454
254	7,536	580
255	7,544	507
256	7,546	448
257	7,548	426
258	7,551	557
259	7,552	432
260	7,553	446
261	7,562	520
262	7,585	443
263	7,598	504
264	7,606	427
265	7,615	438
266	7,617	578
267	7,625	513
268	7,625	432
269	7,637	540
270	7,648	566
271	7,656	472

272	7,662	520
273	7,675	429
274	7,676	472
275	7,678	474
276	7,678	468
277	7,694	450
278	7,696	547
279	7,703	482
280	7,713	439
281	7,732	531
282	7,741	483
283	7,745	528
284	7,752	504
285	7,756	382
286	7,759	531
287	7,762	486
288	7,77	597
289	7,787	464
290	7,793	432
291	7,806	556
292	7,826	530
293	7,83	575
294	7,835	422
295	7,842	437
296	7,866	556
297	7,869	482
298	7,87	491
299	7,884	557
300	7,9	459
301	7,904	507
302	7,905	545
303	7,91	473
304	8,03	430
305	8,035	511
306	8,05	434
307	8,053	452
308	8,059	589
309	8,097	492
310	8,097	519
311	8,119	514
312	8,151	562
313	8,154	528
314	8,16	495
315	8,243	489
316	8,26	470
317	8,267	508
318	8,275	491
319	8,297	475
320	8,305	522
321	8,334	584
322	8,338	521
323	8,42	513
324	8,438	503
325	8,482	448
326	8,561	550
327	8,703	477
328	8,872	509
329	8,987	565
330	9,293	519
331	9,657	529