

**INSTITUTO ENSINAR BRASIL  
FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE**

**AUGUSTO CÉSAR DE OLIVEIRA SANTIAGO  
CLEYDIVAN GEOVANI DA COSTA**

**PROGRAMA DE GERENCIAMENTO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E  
SUA APLICABILIDADE EM INDÚSTRIAS**

**JOÃO MONLEVADE  
2019**

**AUGUSTO CÉSAR DE OLIVEIRA SANTIAGO  
CLEYDIVAN GEOVANI DA COSTA**

**PROGRAMA DE GERENCIAMENTO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA E  
SUA APLICABILIDADE EM INDÚSTRIAS**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso  
de Engenharia Elétrica da Faculdade  
Doctum de João Monlevade, como  
requisito parcial para à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.**

**Orientador: Dra. Thaís de Fátima  
Araújo Silva**

**JOÃO MONLEVADE  
2019**



## FACULDADE DOCTUM DE JOÃO MONLEVADE

### FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: PROGRAMA DE GERENCIAMENTO DA DEMANDA E SUA APLICABILIDADE EM INDÚSTRIAS, elaborado pelo aluno AUGUSTO CÉSAR DE OLIVEIRA SANTIAGO, foi aprovado por todos os membros da Banca Examinadora e aceita pelo curso de Engenharia Elétrica da Faculdade DOCTUM de João Monlevade, como requisito parcial da obtenção do título de

### BACHAREL EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

JOÃO MONLEVADE, 10 de setembro 2019

Thaís de F. Araújo Silva

Dr. Thaís de Fátima Araújo Silva

Rinaldo Nonato e Silva

Prof. Esp. Rinaldo Nonato e Silva

ARBR

Prof. Esp. Ana Regina Lara Bretz



## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, por abençoar o nosso caminho e permitir a realização desse sonho.

Em especial aos nossos pais, irmãos e irmãs por serem prestativos e sempre nos apoiarem em momentos difíceis.

Agradecemos a professora Dra. Thaís de Fátima Araújo Silva pelo comprometimento com ótimas orientações que contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

A todos os professores pelos ensinamentos e conhecimentos adquiridos.

Aos amigos que contribuíram e deram força para que chegasse esse momento tão importante. Em especial aos integrantes de grupo Marcelo e Marlon.

“O sucesso nada mais é que ir de fracasso em fracasso sem que se perca o entusiasmo [...]” (Winston Churchill).

## RESUMO

Em indústrias os gastos decorrentes do consumo de energia elétrica representam grande parte dos custos de produção. A busca por melhorar e otimizar o consumo pode produzir como resultado uma melhoria na gestão como um todo. Com o intuito de minimizar no ambiente industrial os custos de utilização de energia elétrica, no presente trabalho é proposta a aplicação de um modelo matemático de Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD) para o deslocamento do consumo em horários de maior tarifação de energia elétrica para intervalos com tarifa menor. Por meio da otimização, são estudadas formas de melhorar a eficiência de um processo de abastecimento de silos de estocagem de matérias primas do setor da sinterização em uma indústria siderúrgica, buscando correlacionar o consumo e a capacidade de utilização dos silos. Foram adotadas análises de condições operacionais de silos começando com cargas de 30%, 50% e 90% da capacidade, visando observar as otimizações e condições de custos em cada situação abordada, de modo a garantir uma maior confiabilidade dos dados levantados na pesquisa. A partir dos resultados, observou-se que a utilização do modelo matemático de GLD permitiu uma redução de custos decorrentes do consumo de energia elétrica além de manter a disponibilidade da produção, sem representar perdas de eficiência na produção analisada.

**Palavras-chave:** Gerenciamento pelo Lado da Demanda; Eficiência; Consumo; Ambiente Industrial.

## ABSTRACT

In industries, the expenses derived from the consumption of electric energy represent a large part of the costs of production. The quest to improve and optimize consumption can result in improved management as a whole. In order to minimize the costs of electricity use in the industrial environment, the present work proposes the application of a mathematical model of Demand Side Management (GLD) for the shift of consumption in times of higher electricity tariffs for breaks with lower rate. Through optimization, ways of improving the efficiency of a process of supplying silos for the storage of raw materials of the sintering sector in a steel industry are studied, in order to correlate the consumption and the capacity of use of the silos. Analyzes of operating conditions of silos were started, starting with loads of 30%, 50% and 90% of the capacity, aiming at observing the optimizations and cost conditions in each situation, in order to guarantee a greater reliability of the data collected in the research. From the results, it was observed that the use of the mathematical model of GLD allowed a reduction of costs due to the consumption of electric energy besides maintaining the availability of the production, without representing losses of efficiency in the analyzed production.

**Keywords:** Demand side management; Efficiency; Consumption; Industrial Environment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de energia elétrica.....	3
Figura 2 – Matriz de geração de energia elétrica no brasil.....	4
Figura 3 – Projeção da demanda total de eletricidade .....	6
Figura 4 – Alterações nas curvas de cargas conforme programas de GLD .....	10
Figura 5 – Circuito de recepção de matéria prima da sinterização.....	30
Figura 6 – Perfil de consumo de eletricidade das correias transportadoras.....	32
Figura 7 – Tarifas da companhia energética de minas gerais (CEMIG).....	32
Figura 8 – Estrutura de otimização.....	35

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Massa dos silos de estocagem em 24 horas .....	38
Gráfico 2 – Vazão de abastecimento dos Silos .....	38
Gráfico 3 – Vazão total de abastecimento dos Silos .....	39
Gráfico 4 – Custo em função do tempo para os silos .....	40
Gráfico 5 – Custo de utilização da Energia Elétrica .....	40
Gráfico 6 – Consumo dos silos em kw/h com peso inicial de 90%.....	42
Gráfico 7 – Vazão de abastecimento dos silos com peso inicial de 90% .....	42
Gráfico 8 – Vazão de abastecimento dos silos com peso inicial de 90% .....	43
Gráfico 9 – Massa em toneladas dos silos com peso inicial de 90% .....	44
Gráfico 10 – Custo de utilização da energia elétrica .....	44
Gráfico 11 – Consumo dos silos em KW/h com peso inicial de 50% .....	45
Gráfico 12 – Vazão de abastecimento dos silos com peso inicial de 50% .....	46
Gráfico 13 – Vazão de entrada dos silos com peso inicial de 50% .....	47
Gráfico 14 – Massa em toneladas dos Silos com peso inicial de 50%.....	47
Gráfico 15 – Custo de utilização da energia elétrica .....	48
Gráfico 16 – Consumo dos silos com peso inicial de 30% .....	49
Gráfico 17 – Vazão de entrada dos silos com peso inicial de 30% .....	49
Gráfico 18 – Vazão de entrada total dos silos com peso inicial de 30% .....	50
Gráfico 19 – Massa em dos silos com peso inicial de 30% .....	50
Gráfico 20 – Custo de utilização da energia elétrica .....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de energia elétrica no brasil .....	5
Tabela 2 – Projeção da população total residente .....	5
Tabela 3 – Informativo de aplicações em que se possibilita o uso do GLD.....	12
Tabela 4 – Relação de Consumo de Energia Elétrica .....	31

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

GLD – Gerenciamento pelo Lado da Demanda

SEE – Sistema de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

PIB – Produto Interno Bruto

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEEE – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

TUST – Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão

TUSD – Tarifa de utilização de Serviços de Distribuição

SIN – Sistema Interligado Nacional

ED – Evolução Diferencial

GRASPC Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

PSO – Particle Swarm Optimization

KV – Quilovolts

KW – Quilowatts

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	2
<b>1 Objetivo Geral</b> .....	2
<b>2.2 Objetivos Específicos</b> .....	2
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	3
<b>3.1 Considerações Iniciais</b> .....	3
<b>3.2 O Setor Elétrico Brasileiro</b> .....	3
<b>3.3 Demanda de Energia</b> .....	5
<b>3.4 Gerenciamento pelo Lado da Demanda</b> .....	7
3.4.1 Aspectos do Gerenciamento da Demanda .....	9
3.4.2 Objetivos do GLD .....	9
3.4.3 Programas de GLD .....	10
3.4.4 Impactos do Sistema GLD .....	12
3.4.5 GLD na Prática .....	14
<b>3.5 Tarifação Elétrica no Brasil</b> .....	18
3.5.1 Tarifação de Distribuição .....	20
3.5.2 Classificação dos Consumidores no Brasil .....	20
3.5.3 Estrutura tarifária .....	21
3.5.4 Modalidades Tarifárias .....	22
<b>3.6 Métodos de otimização aplicados na solução de problemas de GLD</b> .....	24
3.6.1 Algoritmos Genéricos .....	24
3.6.2 Pontos Interiores .....	25
3.6.3 Evolução Diferencial .....	25
3.6.4 GRASP .....	26
3.6.5 PSO .....	26
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	28
<b>5 MODELO MATEMÁTICO</b> .....	29
<b>5.1 Estudo de Caso</b> .....	33
<b>5.2 Resultados e Discussões</b> .....	36
5.2.1 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 01 .....	37
5.2.2 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 02 .....	41
5.2.3 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 03 .....	45

5.2.4 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 04 .....	48
5.2.4 Sugestões de Trabalhos Futuros .....	52
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>
<b>ANEXOS A</b> .....	<b>60</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias de modo geral, são grandes consumidoras de energia elétrica no Brasil (DIAS,1999). Os setores produtivos consomem esta grande quantidade de energia para a realização de suas operações, no entanto, para alguns setores os gastos decorrentes com energia acabam representando uma parcela significativa de gastos totais produtivos.

Dentre os consumidores, o setor de siderurgia demanda de um grande consumo de energia elétrica devida à sua produção. O seu consumo específico de energia se condiciona por diversos fatores, aos quais se destacam: os processos utilizados, a gama de produtos produzidos, o tipo e a qualidade dos materiais, dentre outros.

Na busca por reduzir os gastos provenientes com o custo de energia elétrica, algumas estratégias podem ser adotadas no intuito de otimizar este consumo energético no decorrer do dia. Uma das medidas que podem ser implementadas é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD), que pode contribuir para operar sistemas de forma eficiente e busca modificar a curva de carga através do deslocamento do consumo dos períodos com tarifa de ponta para horários com menor tarifa.

Ao se consumir a energia em horários fora dos considerados de pico de consumo, as tarifas cobradas são menores, contribuindo assim para a redução dos custos. Com a obtenção de redução de custos de consumo, a empresa consegue otimizar seus custos de modo geral, garantindo uma maior disponibilidade de recursos para serem aplicados em outras finalidades.

As estratégias de gerenciamento pelo lado da demanda incluem a redução de cargas durante o período de ponta, o preenchimento de vales no período de menor demanda, a conservação estratégica através do aumento da eficiência no uso da energia e a flexibilidade no controle direto em equipamentos com incentivo de tarifário (SIMÕES, 2000).

Ao deslocar o consumo para outros horários, pode-se obter o ganho da disponibilidade de energia nestes horários. Considerando as características de consumo de energia elétrica de um setor de uma empresa de siderurgia, este trabalho aborda a modelagem matemática de um programa de GLD com intuito de avaliar sua aplicabilidade na indústria.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

A partir das considerações feitas na introdução, o presente trabalho busca realizar o levantamento teórico acerca dos principais programas de Gerenciamento pelo Lado da Demanda e apresentar um modelo matemático para GLD para uma indústria siderúrgica com intuito de avaliar sua aplicabilidade no setor industrial.

### **2.2 Objetivos Específicos**

1. Fazer uma pesquisa bibliográfica e avaliar os principais modelos matemáticos de programas de Gerenciamento pelo Lado da Demanda;
2. Realizar um estudo teórico acerca dos fundamentos do programa de Gerenciamento pelo Lado da Demanda, analisando as suas condições e variáveis, tanto para sistemas de potência quanto para indústrias;
3. Analisar as técnicas usuais de gerenciamento, incluindo a redução de pico, preenchimento de vale, deslocamento de carga, conservação estratégica, e curva de demanda flexível;
4. Elaborar e avaliar um modelo matemático de GLD em um setor de uma usina siderúrgica tendo como base modelos na literatura;

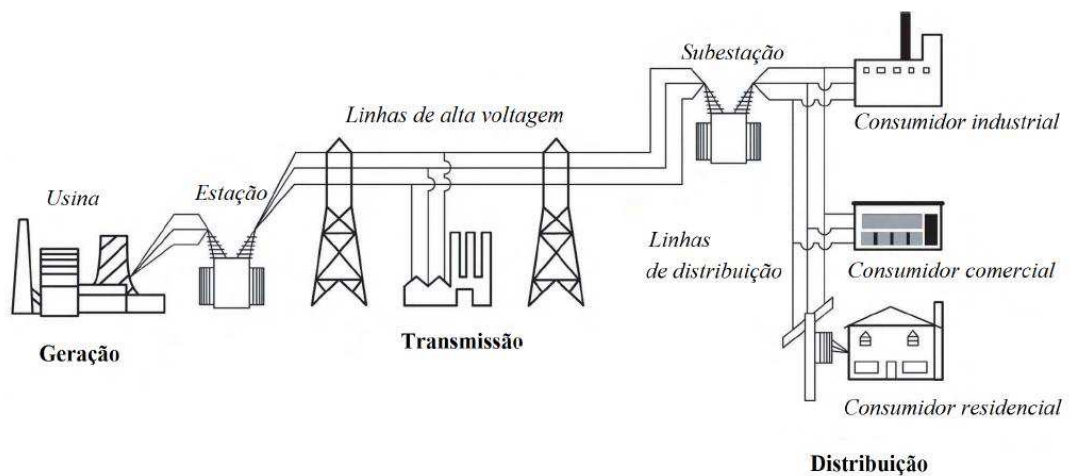
### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

O capítulo ora escrito prioriza os fundamentos teóricos. São apresentados os aspectos principais do Gerenciamento pelo Lado da Demanda.

#### 3.1 Considerações Iniciais

A energia elétrica utilizada pelos consumidores industriais, comerciais e residenciais provém do sistema de energia elétrica (SEE), ilustrado na figura 1 a seguir. A produção é obtida em um sistema de geração proveniente de algum tipo de energia (hidráulica, calorífica, nuclear, dentre outros) em uma usina e transformada em eletricidade. A seguir a energia elétrica é transmitida por meio de linhas de alta tensão até os centros de consumo, passando anteriormente em subestações para a redução da tensão e acondicionamento para a distribuição dos clientes (GUILHERMINO, 2014).

Figura 1 – Sistema de Energia Elétrica



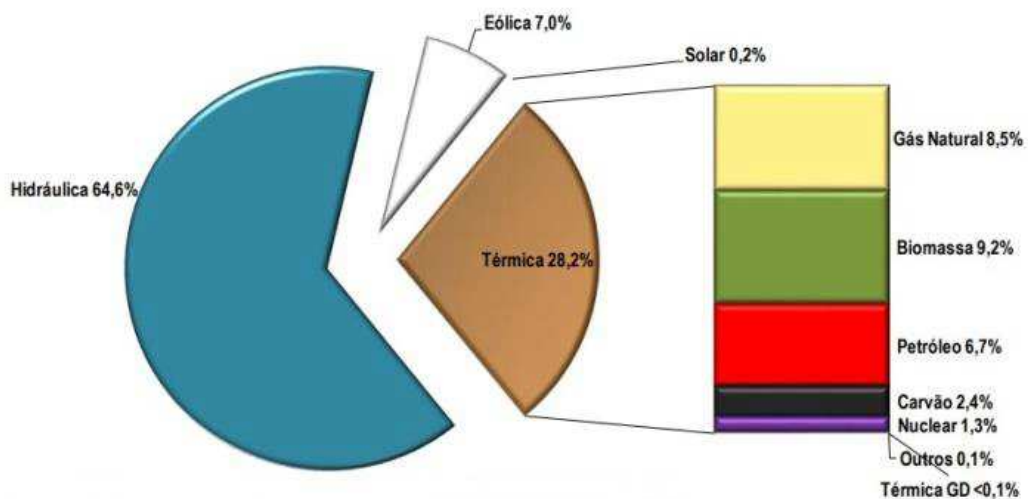
Fonte: Adaptada de Guilhermino (2014)

#### 3.2 O Setor Elétrico Brasileiro

Da geração até a distribuição da energia, são diversas etapas, para garantir a confiabilidade e disponibilidade da energia, a Empresa de Pesquisa Energética – EPE presta serviços ao Ministério de Minas e Energia na área de pesquisas e desenvolvem estudos necessários para planos de expansão do sistema de transmissão de energia elétrica nacional (ANEEL, 2018).

A capacidade de expansão da rede elétrica está diretamente relacionada com as condições disponíveis para a geração da energia (DIAS, 1999). Conforme ilustrado na figura 2 em sequência, parte considerável da matriz energética brasileira é oriunda de hidrelétricas, que abastece grande parte da demanda total de energia elétrica do país (ANEEL, 2018).

Figura 2 – Matriz de Geração de Energia Elétrica no Brasil



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

O consumo de energia elétrica no Brasil tem uma projeção de crescimento médio de 4% ao ano e vem se mantendo a taxas superiores às do Produto Interno Bruto – PIB nacional com perspectiva de se manter assim durante alguns anos. Isso torna o cenário do setor energético brasileiro um tanto quanto preocupante pelo fato de que não há um investimento necessário para a ampliação das matrizes energéticas (EPE, 2018).

Além disso, a compreensão da projeção da demanda de energia é relevante para a previsão dos investimentos necessários para o setor, bem como, possibilita ações gerenciais. A tabela 1 mostra a perspectiva por classe de consumo no período de 2018 a 2022.

Tabela 1– Consumo de Energia Elétrica no Brasil (GWh)

CONSUMO TOTAL	2018	2019	2020	2021	2022	Δ% 2018 ~ 2022
Projeção de consumo	476.441	494.818	513.324	533.080	554.424	3,9%
Residencial	137.108	142.371	148.032	154.118	160.484	4,0%
Industrial	171.443	178.041	183.833	189.854	196.835	3,5%
Comercial	90.198	93.676	97.438	101.562	105.875	4,1%
Outras classes	77.692	80.730	84.021	87.546	91.231	4,1%

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2018)

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE constitui no principal provedor de dados e informações do país. A tabela 2 a seguir refere-se a dados estatísticos do IBGE que mostram que para os próximos anos o Brasil terá um aumento de 13 milhões de habitantes.

Sendo assim, juntamente com a facilidade na obtenção de novas tecnologias por diferentes classes da sociedade o setor energético deverá ser ampliado para o atendimento necessário da demanda de energia elétrica (IBGE, 2018).

Figura 2 – Projeção da População Total Residente (Mil Habitantes)

Ano	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
2016	17.822	57.085	86.653	29.542	15.768	206.871
2021	18.885	58.585	89.348	30.483	16.792	214.094
2026	19.799	59.728	91.457	31.232	17.703	219.918
Variação (% ao ano)						
2016-2021	1,2	0,5	0,6	0,6	1,3	0,7
2021-2026	1,0	0,4	0,5	0,5	1,1	0,5
2016-2026	1,1	0,5	0,5	0,6	1,2	0,6

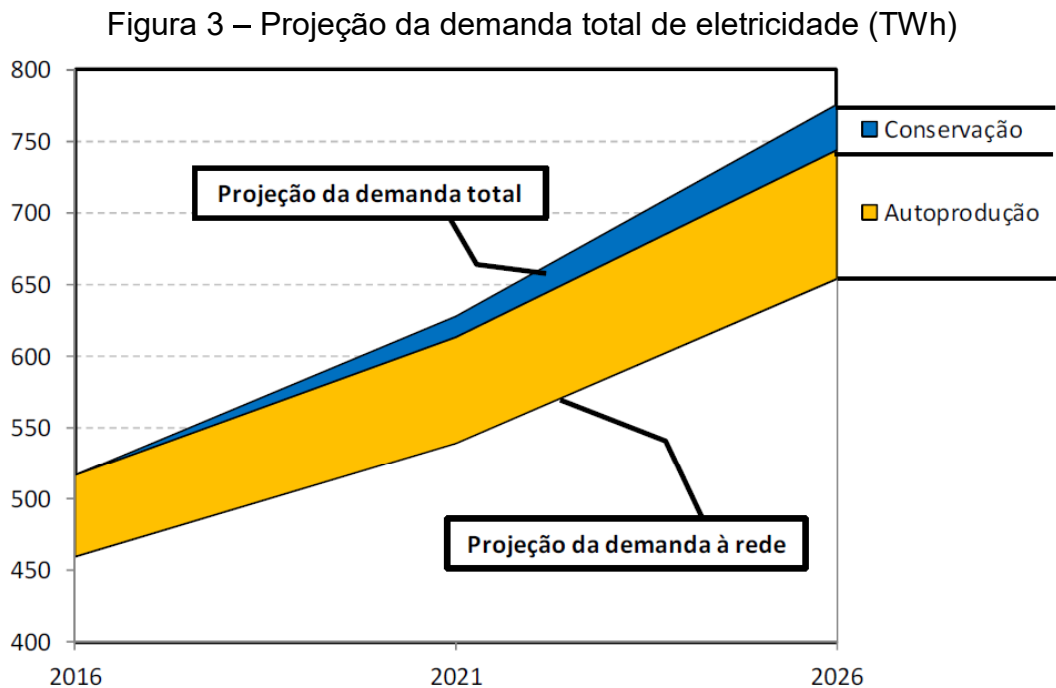
Fonte: Adaptada de IBGE (2016)

### 3.3 Demanda de Energia Elétrica

A demanda de energia elétrica está diretamente relacionada, ao desenvolvimento e ao crescimento industrial. A expansão do sistema de geração e distribuição está ligada ao aumento da necessidade de consumo de energia. A Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2017) divulgou a projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2016-2026), um documento completo delimitando as expectativas de demanda do setor elétrico.

Ao buscar determinar expectativas de previsibilidade para períodos posteriores, são levados em conta as condições atuais e projeções. A capacidade ou não de prever as demandas futuras de energia elétrica se condiciona com base em projeções do consumo de energia elétrica na rede, levando em consideração as análises de previsibilidade das condições econômicas e energéticas, abordando o cenário macroeconômico, as condições demográficas e de eficiência (EPE, 2017).

A figura 3 apresenta a projeção de demanda total de eletricidade no Brasil. Observa-se a contribuição referente à autoprodução e conservação de energia. Vale destacar o aumento gradativo da conservação de energia, isto é, o ganho em eficiência energética a partir de 2016.



Fonte: Adaptada da Empresa de Pesquisa Energética (2017)

O termo Conservação de Energia está diretamente correlacionado a adoção de medidas de racionalização da energia, por meio da utilização consciente da mesma ou pela adoção de equipamentos mais eficientes no consumo. A introdução da Conservação de Energia, segundo Dias (1999), engloba seis níveis de intervenção:

- Eliminação de desperdícios;
- Maior eficiência das unidades consumidoras;
- Maior eficiência das unidades geradoras;

- Reaproveitamento e reutilização dos recursos naturais, por meio da reciclagem e redução da utilização dos produtos e serviços;

- Melhorias das relações centro/periferia, relacionada ao transporte e à localização de empresas produtoras e de consumo;

- Alterações dos padrões éticos, favorecendo a penalização da utilização de produtos e serviços menos eficientes.

Considerando os dados da figura 3, as projeções de demanda à rede e de demanda total representam um aumento considerável para os próximos dez anos, caso as expectativas se concretizem. Com maiores demandas, a utilização de formas eficientes de otimização do consumo podem garantir a confiabilidade do sistema.

A expansão do consumo ao mesmo tempo requer uma expansão na geração da energia e uma maior eficiência por meio da conservação de energia. É importante salientar que estas previsões tendem a assumir valores superiores para cenários de expansão maior dos parâmetros analisados e o oposto ocorre em condições de decréscimos dos indicadores abordados.

### **3.4 Gerenciamento pelo Lado da Demanda**

O gerenciamento pelo lado da demanda – GLD surgiu nos Estados Unidos na década de 70 com intuito de promover o uso eficiente da energia elétrica. A otimização do setor energético pode postergar os investimentos na construção de novas usinas hidrelétricas e reduzir o consumo de recursos não renováveis em termelétricas (CAMARGO, 2011).

De acordo com Albadi e El-Saadany (2007), o gerenciamento pelo lado demanda, ocorre por meio da adoção de programas capazes de gerar mudanças nos hábitos e padrões de consumo dos usuários finais.

O direcionamento principal do gerenciamento é diminuir o pico de demanda do sistema, reduzindo o consumo e melhorando a confiabilidade do fornecimento energia elétrica. A grande maioria destes programas dizem respeito a eficiência energética e incentivos financeiros por meio de tarifas diferenciadas por horários (TORRES, 2017).

Para Torres (2017), a adoção de medidas pelas concessionárias de energia elétrica pelo GLD, visa gerar uma redução do consumo dos clientes em horários de maior demanda, gerando maior confiabilidade do sistema.

Segundo Goulart (2015, p.2):

[...] o gerenciamento de demanda de energia quando concebido deve ser direcionado a um objetivo específico, podendo ser desenhado para a redução do pico de consumo, para o preenchimento de vales de demanda em horários específicos, mudanças na curva de carga de determinadas classe consumidoras, conservação estratégica, crescimento estratégico e até mesmo para construção de curvas de cargas flexíveis.

O conhecimento sobre o fundamento em que se baseia o gerenciamento é relevante para compreender em como são determinados os investimentos e as expansões do sistema, pois, os mesmos são elaborados considerando a capacidade máxima de fornecimento (GOULART, 2015).

Atualmente, os projetos de expansão do sistema elétrico são feitos considerando a capacidade máxima de fornecimento para atendimento de uma região. No entanto, a grande maioria dos sistemas somente atinge valores próximos a essa capacidade durante um período de fornecimento curto, denominado horário de ponta do sistema elétrico. Desta forma, transformadores, linhas de transmissão e distribuição e outros equipamentos são dimensionados.

Neste contexto, o GLD tem como objetivo reduzir a demanda máxima pelo lado do consumidor, permitindo dessa forma que equipamentos de geração, transmissão e distribuição atendam com segurança a demanda exigida, combatendo perdas técnicas, incentivando o uso eficiente da energia elétrica e modelando o perfil de consumo no horário de ponta (CAMARGO, 2011).

O princípio básico é deslocar a demanda desde intervalos de tempo caros para outros mais baratos. Os intervalos mais caros geralmente correspondem a períodos de pico de demanda, sendo que o GLD tende a diminuir a diferença entre picos e vales na curva de demanda. Desta forma, o GLD e o mecanismo de formação de preço estão relacionados (SIMÕES, 2000).

Por meio do deslocamento pelo lado da demanda, as empresas consumidoras conseguem obter uma redução dos valores tarifários justamente por reduzirem o consumo em horários em que são aplicados maiores tarifários.

#### 3.4.1 Aspectos do Gerenciamento da Demanda

A abordagem do gerenciamento de demanda de energia elétrica está correlacionada ao processo decisório estratégico buscando adotar medidas que gerem melhores condições estruturais e econômicas.

De acordo com Slack (1997), os métodos e técnicas de previsibilidade podem ser agrupados em relações causais e não causais, e em termos de objetividade e subjetividade. Os métodos objetivos empregam ações especificadas e sistemáticas, enquanto que os subjetivos abordam aspectos como a intuição e o julgamento com base na experiência.

Em consideração as técnicas não causais são trabalhadas os dados passados como previsões e estimativas futuras. Já nas técnicas causais são trabalhadas técnicas para estabelecer previsões por meio de equações que abordam a relação de causa-efeito (SLACK, 1997).

#### 3.4.2 Principais Técnicas do GLD

As técnicas de gerenciamento pelo lado da demanda incluem a suavização de pico sendo uma das mais clássicas formas de gerenciamento de carga e é definido como a redução da carga de ponta (CAMPOS, 2004).

O preenchimento de vales é a segunda forma clássica de gerenciamento da carga e pode ser particularmente interessante naqueles períodos do ano em que o custo de produção supera o custo médio.

A terceira forma clássica de gerenciamento é o deslocamento da carga do horário de pico para o horário fora do pico, uma aplicação interessante é o deslocamento do horário de uso do chuveiro elétrico (CAMARGO, 2011).

Outra mudança diz respeito a conservação estratégica de energia elétrica, é uma alteração na curva da carga gerada pelo incentivo a troca de aparelhos para novos mais eficientes (CAMPOS, 2004).

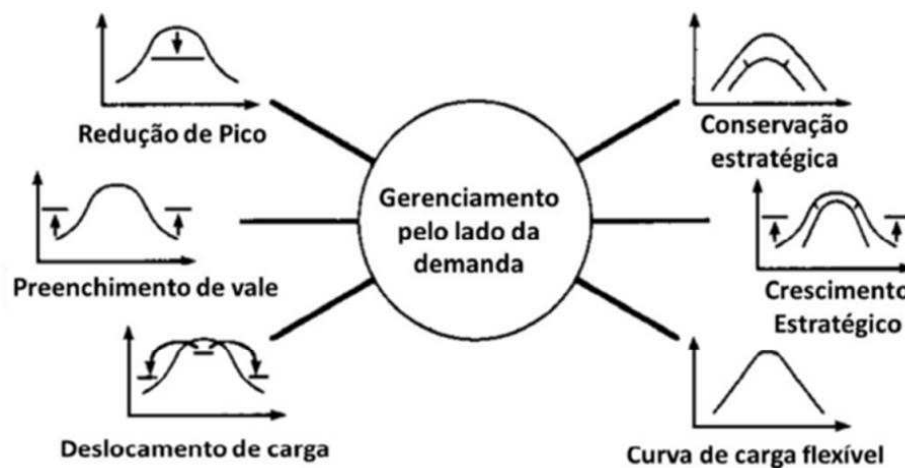


Segundo Campos (2004), no crescimento estratégico da carga ocorre um aumento das vendas de forma estimulada pela empresa. São adotadas medidas como, por exemplo, incentivos na substituição de óleo combustível em caldeiras industriais por eletricidade.

A curva de carga flexível é uma outra estratégia adotada de modo assegurar a confiabilidade ao se planejar o futuro da demanda. A carga poderá ser flexível caso os consumidores tenham opções de qualidade de serviços de acordo com os preços (CAMPOS, 2004).

As seis técnicas de gerenciamento pelo lado da demanda podem ser observadas na figura 4 (GOULART, 2015).

Figura 4 – Alterações básicas nas curvas de cargas conforme programas de GLD



Fonte: Adaptada de Goulart (2015)

### 3.4.3 Programas de GLD

Programas de gerenciamento pelo lado da demanda são usualmente aplicadas em diversas condições. Dentre as principais podem se destacar a aplicabilidade pelas concessionárias de energia com objetivo de provocar modificações na curva de carga de consumo de energia elétrica (CAMPOS, 2004).

A classificação de alternativas de GLD desenvolvida pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) apresenta diferentes possibilidades para aplicação destas.

Gellings e Chamberlin (1993), afirmam que o gerenciamento pelo lado da demanda tem como fundamento a integração dos planejamentos e operações de energia elétrica com os conceitos que influenciam na demanda por eletricidade.

Para a efetivação do gerenciamento, Campos (2004) ressalta que a aproximação das empresas elétricas com os clientes é relevante e para que isso ocorra, são oferecidos e condicionados benefícios mútuos para ambos. As empresas ganham com a mudança do perfil da curva de carga e os clientes conseguem controlar os gastos com a energia.

O controle de equipamentos de uso final é uma das áreas com desenvolvimento mais ativo na tecnologia de GLD. Apesar de cargas menores, o segmento residencial é o que apresenta maiores possibilidades para gerenciamento e possui o maior número de clientes.

Embora o consumo residencial seja pequeno, a quantidade de moradias juntamente com a facilidade de consumo, são fatores em que promovem melhores resultados. Em grandes consumidores e comércios, o GLD muitas das vezes é mais oneroso e trabalhoso de ser implementado.

Ao se analisar o GLD em relação ao consumo dos diversos consumidores, uma das possibilidades é o controle individual de aparelhos de grande demanda. No Brasil a grande incidência de consumo em picos do sistema decorre devido a utilização de equipamentos ineficientes como ar condicionados e chuveiro elétrico, a utilização de novos recursos para aquecimento da água do banho, como por exemplo, por meio de sistema de aquecimento a gás ou solar e/ou a adoção de instalações de sistema condicionado de ar central, são medidas que proporcionam menores demandas (CAMPOS, 2004).

Promoções junto aos consumidores são atividades planejadas pelas empresas para motivar ações dos consumidores na direção dos objetivos propostos por um programa de GLD. Estas atividades devem buscar transformar o programa de GLD num programa da comunidade, envolvendo inteiramente toda a comunidade com o objetivo de reconfigurar a curva de carga, principalmente no que diz respeito à redução da carga de pico. Este tipo de programa leva em conta a premissa de que a maioria das pessoas tem baixa consciência dos conceitos de gerenciamento de carga, mas responderão a incentivos (CAMARGO, 2011).

Algumas das condições de gerenciamento pelo lado de demanda nas mais diversas aplicações foram levantadas por Delgado (1985). A tabela 2 apresenta as

diferentes aplicabilidades que podem ser adotadas o GLD nas seguintes otimizações.

Tabela 2 – Informativo de Aplicações em que se possibilita o uso do GLD

<b>ALTERNATIVA</b>	<b>POSSIBILIDADES</b>
Controle de equipamento de uso final	Controles operacionais de equipamentos individuais Ar condicionado central em consumidores industriais e comerciais Aquecimento de água residencial ou comercial
Controle de equipamentos da empresa de energia	Redução de tensão Controle do alimentador Controle do fator de potência
Estocagem de energia	Estocagem de frio e calor Uso de calor residual
Incentivos por meios tarifários	Tarifa diferenciada no tempo Tarifa Interruptiva Uso final Contratos de controle de carga Tarifa por demanda, programas especiais
Geração dispersa	Eólica Solar Célula de combustível Geradores de espera Cogeração, centrais hidrelétricas
Melhoria no desempenho de equipamentos	Equipamentos com eficiência energética

Fonte: Adaptada de Delgado (1985)

#### 3.4.4 Impactos do Sistema GLD

Os Impactos do Sistema de Gerenciamento pelo Lado da Demanda podem ser avaliados sob a ótica da concessionária, dos consumidores e da sociedade.

As concessionárias de energia elétrica necessitam avaliar o quanto pode ser postergado em capacidade geradora e em instalações de transmissão e distribuição. O GLD para as concessionárias teoricamente, conseguem alterar o padrão de

consumo de energia, promovem a resolução de diversos problemas operacionais através da modificação e/ou redução da carga (CAMARGO, 2011).

O GLD impacta não somente nas reservas convencionais, como também, contribui para os impactos gerados na adoção de fontes de energia renováveis. Com o crescimento da utilização de recursos renováveis, a demanda pode ser impactada devida as condições de geração das mesmas, bem como, a diminuição da disponibilidade de usinas na geração de energia (ARAÚJO, 2015).

Os impactos sobre o planejamento e a operação serão traduzidos em requisitos de lucro para um determinado nível, dada uma programação tarifária para o GLD e para outras classes de consumidores. Caso a análise financeira resulte desfavorável para a empresa, esta poderá propor alterações na tarifa. A utilização dos sistemas de gerenciamento deve atender a critérios que façam com que a operação mantenha o controle do sistema elétrico (CAMARGO, 2011).

Analisando o gerenciamento pela demanda, os impactos relacionados aos consumidores normalmente afetam o uso da demanda promovendo alterações nas instalações e nos aparelhos de energia elétrica, alterando o modo de uso dos aparelhos existentes e mudando os hábitos dos consumidores em relação à utilização da energia elétrica.

Na sociedade como um todo, as práticas de GLD impactam nos custos econômicos, pois, impactam nos custos da energia elétrica. Os custos diretos das distribuidoras são impactados nas despesas administrativas de operação, sendo possíveis de serem estabelecidos pelos mercados.

A maneira importante de alterar o comportamento do consumidor é através de tarifas que incentivem o gerenciamento indireto de demanda. Os programas de GLD oferecem à sociedade uma forma de participar e influir no uso da energia. Esta participação é essencial para que a sociedade possa de fato controlar as organizações no sentido de um uso mais racional dos recursos energéticos, permitindo criar uma sociedade energeticamente correta e onde seja democratizado o acesso das camadas menos favorecidas aos benefícios advindos do uso da energia (CAMARGO, 2011).

Para Campos (2004), é praticamente impossível referir ao GLD sem abordar os preços e tarifas. Em quase todos os programas implementados, algum incentivo ou tarifa diferencial é introduzida com forma de motivar os participantes, sendo

assim, um dos focos principais do GLD é a compreensão dos preços e suas correlações.

Na literatura e na prática, o GLD aborda programas de incentivo com base em tarifas, o enfoque deste trabalho será a análise, considerando como fundamento as condições relacionadas a tarifação como incentivo.

### 3.4.5 GLD na Prática

O gerenciamento pelo lado da demanda apresenta como principais aplicações usuais na literatura:

- A utilização de restrições de energia, que acoplam os intervalos do horizonte de otimização;
- A representação do deslocamento de montantes de carga correspondentes a processos;
- A consideração da capacidade de resposta rápida aos sinais enviados pelo operador do sistema, propriedade típica de cargas flexíveis automáticas (ARAUJO, 2015, p.23).

Considerando os tipos de consumidores, os comerciais conseguem melhor apresentarem uma redução de carga em relação ao preço obtido por gerenciar o corte em horários de pico, pois os mesmos podem ser modelados com base em uma restrição estipulada pelos programas de redução de cargas. Os consumidores residenciais apresentam boas condições de redução, devido a facilidade de deslocamento de consumo de carga por um certo horizonte de tempo (ARAUJO, 2015).

As práticas de GLD são implementadas mundialmente nas mais diversas aplicações. Em muitos dos casos os estudos consistem em modelos e simulações com o intuito de melhor gerenciar a demanda para induzir a redução do consumo em determinadas situações em que pode gerar sobrecargas no sistema às mudanças na eletricidade.

Mohagheghi e Raji (2014) realizaram um estudo para estabelecer um gerenciamento de demanda para unidades industriais. Segundo os autores, um cliente industrial consegue reduzir seu consumo utilizando a geração no local, o armazenamento de energia e alocando a demanda para períodos de tempo diferentes. O deslocamento da demanda abordado, exame prático que representa

um benefício mútuo para as empresas consumidoras e as fornecedoras de energia pois, para as fornecedoras representa uma menor demanda de energia nos horários considerados de pico, garantindo maior confiabilidade no sistema de fornecimento, já os consumidores ganham por conseguirem um custo menor de energia.

No estudo, os autores realizaram uma análise industrial considerando a utilização de cada estação de trabalho, definindo as prioridades de demanda de energia. O método consiste em analisar a possibilidade de deslocamento do consumo para horários sem muita demanda de energia. A análise levou em conta as restrições existentes para as condições de manutenção ou aumentos dos consumos devidos às atividades operacionais, além de executar um planejamento para conciliação das otimizações de horários para o deslocamento da demanda (MOHAGHEGHI e RAJI, 2014).

Para proceder a uma análise industrial é preciso a avaliação completa da planta, podendo definir as operações prioritárias ou até mesmo a redução da produção. As perdas decorrentes da redução dos trabalhos precisam ser comparadas com os ganhos obtidos por um menor consumo nos horários de pico (MOHAGHEGHI e RAJI, 2014).

A proposta do estudo realizada em uma planta industrial de produção de veículos conteve três módulos. A primeira etapa consiste em uma classificação das estações de trabalho com base nas prioridades de demanda, a segunda compreende na análise das mudanças em tempo real do consumo das estações de trabalho e a terceira analisa as restrições de deslocamento de consumo das estações definindo um melhor horário para as operações de cada setor. Para a execução do trabalho, foi elaborado um algoritmo para a determinação das condições de consumo, buscando obter por meio de simulações, valores mais próximos das condições ideais de equilíbrio dos custos com os aspectos operacionais. Por meio do algoritmo utilizado, obteve-se uma melhoria dos consumos da planta, porém a decisão de implementação requer a análise de viabilidade econômica, considerando que torna possível a melhoria da demanda ou a maximização da produção. No caso considerado de aumento de produção, a mesma poderia ter problemas relativos a estoque, porém, no deslocamento da demanda, a empresa poderia ter incentivos de consumo em determinado horário e contar com uma redução tarifária (MOHAGHEGHI e RAJI, 2014).

Por sua vez Zhang *et. al.* (2015) realizaram um estudo para promover um escalonamento de consumo para processos industriais contínuos. No estudo foram tratados situações de grande consumo, baseando na otimização de ajustes de demanda para formular um modelo de processamento de dados em tempo real, considerando uma incerteza na demanda de redução de carga.

Observa-se ao analisar grandes consumidores, que o GLD acaba sendo uma tarefa complexa devidas as dificuldades de se deslocar o consumo especialmente em condições de processos contínuos e intermitentes, no entanto, em se tratando de um consumo de carga mais linear, um modelo de gerenciamento de demanda pode ser viável economicamente em se tratando de maximização da utilização da planta industrial (ZHANG *et. al.* 2015).

Neste tipo de estudo, ao propor uma maneira de distribuir de forma mais homogênea o consumo propondo realizar atividades menos prioritárias em horários fora da grande demanda, podem gerar uma melhora na gestão de consumo, otimizando os custos das empresas.

A explicação atribuída ao aperfeiçoamento obtido ao se utilizar uma maximização da planta industrial é o aproveitamento das instalações para melhoria da produtividade. Com os modelos matemáticos implementados, a simulação computacional apresentou maior eficiência ao focar na produtividade máxima, podendo assim, gerar para algumas aplicações em que necessita de grande demanda, utilizar toda capacidade produtiva em algumas situações e reduzir o consumo em condições que o fornecimento se torna mais oneroso (ZHANG *et. al.* 2015).

Zhong *et. al.* (2014), realizaram um estudo de modo a melhorar o gerenciamento de demanda na China, considerando variados tipos de clientes. Para o trabalho, consideraram a determinação de um custo de ajuste de carga para expressar a disposição dos clientes de alterar seus níveis de consumo. Segundo as respostas obtidas dos clientes analisados, o estudo aborda o modelamento por meio das deslocamento dos horários de consumo e a conscientização do modo de consumo. Uma das grandes vantagens do método tratado é a consideração real das intenções dos clientes em melhorar a gestão do consumo.

Por meio do conhecimento de como cada cliente pode trabalhar o seu consumo é possível fazer simulações em larga escala, tratando da terminação da otimização de consumo possível a ser alcançada com as mudanças de hábitos. Em

larga escala ou em consumidores industriais, tal método requer uma busca pela melhoria da gestão de demanda, por se tratar de condições complexas de determinação de demanda (ZHONG *et. al.*,2014).

Os diversos estudos existentes apontam condições de melhorias possíveis de serem implementadas nas mais variadas aplicações. Para melhor planejamento e abordagem, a utilização de simulações e modelamentos matemáticos acabam sendo alternativas eficientes por serem de baixo custo de execução e também por fornecerem condições de reproduzir possíveis aplicações reais antes de gerar as modificações necessárias.

Além da apresentação dos modelos de GLD, os estudos citados apresentam como característica a utilização de algoritmos para resolver o modelo matemático proposto. Os métodos geralmente encontrados na literatura são:

- Algoritmos genéticos são algoritmos matemáticos para a simplificação de deslocamento de demanda considerando diversos equipamentos e uma facilidade de deslocamento da demanda (MOHAGHEGHI e RAJI, 2014).
- Demais algoritmos matemáticos, trabalham geralmente para situações em que apresentam dados matemáticos a serem calculados segundo alguma metodologia para proceder a previsão de demanda. Podem ser aplicados também em situações em que a variedade de aplicações e de equipamentos de controle é menor, como apresentado nos estudos segundo Zhang *et. al.* (2015) e Zhong *et. al.*(2014).

A utilização de algoritmos e modelamentos dependem das condições de aplicação das mesmas. Algoritmos são mais aplicados em situações de grande variedade de equipamentos e de variáveis a serem adotadas em um sistema, já o modelamento matemático é melhor empregado em situações em que as condições operacionais são mais constantes, podendo ser representadas situações reais através de cálculos matemáticos.



### 3.5 Tarifação Elétrica no Brasil

Nas condições de GLD um dos principais fatores é a tarifação da energia elétrica. As tarifas cobradas acabam representando um relevante custo aos consumidores, já para os distribuidores servem como forma de remuneração do fornecimento da energia.

Ao se buscar reduzir a demanda de energia, o custo como um todo tende a reduzir, os consumidores por meio da otimização do consumo através do GLD conseguem obter um valor pago em tarifas menor.

A tarifação de energia elétrica pode ser estabelecida como o valor cobrado por unidade consumida (R\$/KWh). O valor cobrado é decorrente de todos os custos no processo de fornecimento de energia, desde a sua geração até a distribuição ao consumidor final. Estão contidos nestes valores, também outros custos, como o de disponibilidade, segurança e impostos (BRASIL, 2017).

O valor de cobrança tarifário é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, sendo os custos dimensionados com o propósito de arcar com todos os custos de operação e expansão do sistema elétrico brasileiro.

Segundo a resolução normativa da ANEEL, 2017, as tarifas de aplicações estabelecem os seguintes critérios (BRASIL, 2017, p.1):

§1º É vedado à distribuidora cobrar dos usuários, sob qualquer pretexto, valores de tarifas superiores àquelas homologados pela ANEEL.

§2º As tarifas homologadas pela ANEEL deverão ser reduzidas quando de sua aplicação pelas distribuidoras nas situações em que houver a previsão legal de benefícios tarifários relacionados à prestação do serviço público.

§3º É facultado à distribuidora cobrar tarifas inferiores às tarifas homologadas pela ANEEL, desde que as reduções de receita não impliquem pleitos compensatórios posteriores quanto à Recuperação do Equilíbrio Econômico Financeiro...

§4º As tarifas devem ser aplicadas de acordo com o tipo de usuário, o grupo e subgrupo, classe e subclasse e a modalidade tarifária a que estiver enquadrada a unidade consumidora...

As distribuidoras necessitam de homologação da ANEEL para repassar aumentos de custos aos seus clientes, com isso, a vigência de aumentos requer autorização competente, evitando assim possíveis abusos.

O valor tarifário é definido por meio da modalidade de sistema de transmissão ou para o sistema de distribuição. Na modalidade de transmissão, o valor cobrado

na tarifa é estabelecido com base na remuneração dos investimentos realizados pelas concessionárias que detêm as concessões.

Segundo o site da ANEEL (2019), adotando a cobrança por transmissão, os usuários da geração, distribuição e consumidores recebem a cobrança pelo uso da transmissão, chamada de Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão – TUST.

Já a cobrança por sistema de distribuição, a Tarifa de Utilização de Serviços de Distribuição – TUSD, é uma cobrança por distribuição, com o propósito de propósito de custear o uso do sistema de distribuição (ANEEL, 2019).

Em linhas gerais, a TUSD se diferencia da TUST no critério de consumo, caso o consumidor esteja ligado a uma concessionária de distribuição ou se é ligado a uma concessionária de transmissão.

No Brasil, a grande maioria dos consumidores pagam a tarifa de distribuição, por ser a predominante dos consumidores de pequeno e médio porte, especialmente os residenciais e comerciais.

O valor tarifário estabelecidos pela ANEEL estão definidos em contrato das concessões entre a agência e a concessionária de distribuição. Nos contratos de concessão, estão definidas condições de reajustes por períodos anuais ou por processo de revisão chamado de Revisão Tarifária, em que estão estabelecidos reajustes em contrato por um período geralmente de 4 anos (ANEEL, 2019).

A diferenciação entre o reajuste anual, a distribuidora repassa ao consumidor todos os custos envolvidos na compra de energia dos geradores, desconsiderando os custos não gerenciáveis. Os demais custos da distribuidora são repassados nos reajustes de Revisão Tarifária (ANEEL, 2019).

O reajuste anual não gera grandes mudanças tarifárias para as distribuidoras, pois, estabelecem correções com base nos custos de aquisição da energia perante as transmissoras. Já a Revisão Tarifária representa o reajuste com base na provisão de custos e da lucratividade nos próximos quatro anos das distribuidoras.

O cálculo de Revisão Tarifária é obtido com a chancela da ANEEL, considerando os investimentos e gastos da distribuidora, além de estabelecer cenários macroeconômicos do país para traçar expectativas futuras de consumo energético nos quatro anos seguintes.

### 3.5.1 Tarifação de Distribuição

O cálculo de tarifação de distribuição, são baseados dois fatores para a cobrança dos consumidores, a demanda de potência e o efetivo consumo de energia.

A demanda de potência corresponde à demanda requisitada à distribuidora, em que a concessionária deve se comprometer em continuamente disponibilizar a unidade consumidora a potência estabelecida em contrato de fornecimento, independente do uso ou não (TORRES, 2010).

O valor da demanda de potência pode ser aferido pela média de potência elétrica requerida pelo consumidor, mensurada em quilowatt (kW) ou megawatt (MW), no intervalo de 15 minutos (BECKER, 2014).

O valor pago pelo consumidor é estabelecido por meio do produto da demanda de potência pelo preço unitário em R\$/kW ou R\$/MW. No caso do consumo efetivo de energia a mensuração é por quilowatt-hora (kWh) ou em megawatt-hora (MWh), sendo correspondido ao consumo acumulado no tempo pelo uso da potência elétrica fornecida ao consumidor durante o período medido (GOULART, 2015).

Segundo a Resolução Normativa da ANEEL n° 456 (ANEEL, 2000), um consumidor ao estar conectado a um sistema de distribuição, levando em conta as condições de fornecimento na qual se enquadra, seja por demanda de potência ou de consumo de energia, terá como regra o enquadramento tarifário no grupo ao qual está vinculado o seu contrato com a distribuidora.

### 3.5.2 Classificação dos Consumidores no Brasil

De acordo com a Resolução Normativa da ANEEL n° 414, a classificação brasileira de consumo diz respeito ao consumo de tensão, sendo duas classes, a do Grupo A para atendimento de unidades consumidoras acima de 2,3 Kv, estando assim classificados consumidores como indústrias, shoppings centers e grandes edifícios comerciais e a do grupo B em que são para consumidores abaixo de 2,3 Kv (ANEEL, 2010).

Este grupo A está dividido em subgrupos, todos caracterizados por possuir uma tarifa binômia, ou seja, possuem um conjunto de tarifas de fornecimento constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa (kWh) e à

demanda faturável (KW). As unidades consumidoras são alocadas dentro destes subgrupos, para se enquadrar no grupo a unidade consumidora precisa atender os seguintes requisitos segundo a Resolução Normativa da ANEEL n° 414 (ANEEL, 2010):

I) Apresentar o consumo de energia elétrica mensal com um valor igual ou superior a 30 MWh em, no mínimo, três ciclos completos e consecutivos nos seis meses;

II) Possuir especificado em contrato de fornecimento a demanda contratada com valor igual ou superior a 150 KW.

O Grupo B corresponde as demais unidades de consumo, classificadas como de baixa tensão com valores abaixo de 2,3 Kv, sendo em grande maioria atendidas nas tensões de 127 ou 220V.

Além dos grupos, existem também classificações em subgrupos, conforme a sua função de demanda (KW) ou por nível de tensão, assim podem ser divididos os consumidores deste grupo (ANEEL, 2010):

- Subgrupo B1 – residencial;
- Subgrupo B2 – rural;
- Subgrupo B3 – demais classes;
- Subgrupo B4 – iluminação pública.

A utilização da classificação dos consumidores em grupos e subgrupos, facilita a separação das unidade consumidoras nas condições de tarifação, com base no consumo e na demanda.

### 3.5.3 Estrutura tarifária

A denominação de estrutura tarifária diz respeito, ao conjunto de tarifas que são incidentes sobre os componentes do consumo elétrico e/ou da demanda de potência de cada consumidor. A estrutura brasileira estabelece os preços cobrados corrigidos no processo de reajuste e de revisão tarifária das distribuidoras, como detalhado nas condições da Resolução Normativa da ANEEL n° 456.

Segundo o Despacho N° 1.365 da ANEEL (2015), algumas alterações ocorreram nos últimos anos com as tarifas de baixa tensão, por meio da implementação de bandeiras tarifárias. Neste sistema, são adotadas as modalidades de bandeiras: verde, amarela e vermelha, em que indicam a incidência ou não no

valor da energia repassada ao consumidor final, devida as condições de geração de eletricidade.

A incidência das bandeiras tarifárias visa cobrir os gastos maiores de geração de energia decorrentes das condições climáticas e de capacidade de geração da energia em cada matriz geradora. A cobrança abrange todos os estados da federação, com a exceção de Roraima por não fazer parte do Sistema Interligado Nacional (SIN), por receber a energia proveniente da Venezuela (ANEEL, 2019).

Cada modalidade apresenta as seguintes características:

Bandeira verde: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;

Bandeira amarela: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,010 para cada quilowatt-hora (KWh) consumidos;

Bandeira vermelha - Patamar 1: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,030 para cada quilowatt-hora KWh consumido.

Bandeira vermelha - Patamar 2: condições ainda mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,050 para cada quilowatt-hora KWh consumido (ANEEL, 2019, p.1)

Todos os consumidores atendidos pelo SIN são tarifados pelo Sistema de Bandeiras Tarifárias. A grande maioria da geração elétrica brasileira corresponde a matriz hidrelétrica, sendo nos meses mais secos do ano acionados diferentes sistemas de geração com custos mais elevados, justificando assim a adoção das bandeiras tarifárias para cobrir os aumentos de custos do sistema (ANEEL, 2019).

#### 3.5.4 Modalidades Tarifárias

O modelo tarifário da energia elétrica no Brasil consiste de um conjunto de regras e diretrizes que determinam o preço da energia paga pelos consumidores no país. A tarifação de energia leva em consideração diferentes classes de consumo conforme as atividades exercidas pelos contratantes e o propósito no qual é utilizada a energia. As classes de consumo são enquadradas em dois grupos tarifários, sendo os consumidores do grupo A e grupo B (ANEEL, 2018).

Consumidores do grupo B, com fornecimento em tensão inferior a 2,3 KV, pagam pela modalidade convencional e é caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica independente das horas de utilização do dia. No início de 2018, unidades com média anual de consumo mensal superior a 500 KW/h tiveram como

opção a adesão em tarifa alternativa, possibilitando preços atraentes para o consumo de energia elétrica fora do horário de ponta (ANEEL, 2018).

Consumidores do grupo A, com tensão de fornecimento superior a 2,3 KV, tem a disposição três opções de modalidade tarifária para escolha a seu critério. A estrutura tarifária azul é caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia. A modalidade tarifária verde possui tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda e de potência (ANEEL, 2018).

Diferente do grupo B, o sistema tarifário aplicado aos consumidores do grupo A incentiva o uso eficiente de energia elétrica, contribuindo através do sinal de preço que consumidores possam se beneficiar concentrando seu consumo fora do horário de ponta. Essa prática está entre as principais no gerenciamento pelo lado da demanda.

No contexto do Gerenciamento pelo Lado da Demanda o método incentivado envolve ações que interferem diretamente no uso da energia pelos consumidores através de tarifas diferenciadas. O consumidor modula voluntariamente sua carga para períodos fora de ponta com o incentivo de tarifas menores resultando em uma melhor utilização dos recursos energéticos disponíveis (CAMARGO, 2011).

A estrutura tarifária azul exige um contrato específico com a concessionária, neste documento consta o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta e nos horários fora de ponta. A fatura cobrada pelos consumidores nesta modalidade constam da soma de parcelas referentes ao consumo e caso a demanda seja ultrapassada é cobrado um acréscimo pelo consumo excedente. Os valores cobrados na tarifa são variados para os horários de ponta e fora de ponta, por isso, constam no contrato valores de demanda para os diferentes horários (ANEEL, 2018).

Podem ainda ser diferenciadas cobranças em períodos úmidos e secos, desde que sejam especificados nos contratos para saber o valor a ser tarifado, é preciso analisar os quatro valores contratuais, (demanda na ponta e fora da ponta, nos períodos secos e úmidos), apresentando assim o consumo do cliente a ser considerado (ANEEL, 2018).

A ANEEL (2018) estabelece que sobre os atrasos no pagamento de faturas, os clientes pagam uma multa máxima de 2% sobre o valor em atraso, vindo a ser

cobrada nas próximas faturas, sem a geração de multa sobre uma multa anteriormente cobrada. As mesmas condições por atrasos podem ser cobradas sobre as prestações de serviços ao consumidor, exceto se no contrato for citado um valor menor de cobrança.

### **3.6 Métodos de otimização aplicados na solução de problemas de GLD**

Em termos gerais, os modelos matemáticos de otimização para um programa de GLD pode possuir características diversas: variáveis contínuas, inteiras, modelos de programação inteira e mista. De acordo com suas características, diferentes algoritmos podem ser aplicados nas finalidades de melhoria dos custos e otimização dos consumos. Considerando estes objetivos, a seguir estão explicados alguns tipos de algoritmos de otimização mais abordados.

#### **3.6.1 Algoritmos Genéticos**

Um algoritmo genético pode ser considerado um método heurístico ao se abordar a resolução de problemas complexos adotando uma quantidade não muito grande de recursos, principalmente no que diz respeito ao consumo ao longo do tempo. O uso dos métodos heurísticos se destaca pelo seu bom desempenho médio nas aplicações práticas, nas quais não são possíveis por meio de algoritmos probabilísticos e de aproximação resultados garantidos (SUCUPIRA, 2004).

As pesquisas abordando os métodos heurísticos, levaram ao surgimento de esqueletos de algoritmos denominados meta-heurísticos, o termo pode ser definido da seguinte maneira:

Uma meta-heurística é um conjunto de conceitos que podem ser usados para definir métodos heurísticos que podem ser aplicados a um amplo conjunto de diferentes problemas. Em outras palavras, uma meta-heurística pode ser vista como uma estrutura algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização com relativamente poucas modificações para torná-los adaptados a um problema específico (METAHEURISTICS NETWORK, 2019, p1).

A utilização de algoritmo genético se destaca em situação em que se faz necessário a utilização de diferentes dados utilizando de forma simplificada modelos matemáticos nos quais se aplicam em situações semelhantes. Um exemplo seria a construção de algoritmos para diferentes equipamentos porém com a mesma funcionalidade.

No caso da utilização em GLD, Yao *et. al.* (2015), destaca a condição de adoção do algoritmo genético para melhoria da alocação horária de uma planta industrial. Por meio deste tipo de algoritmo é possível estabelecer o melhor horário para alocar cada equipamento disponível.

Algumas cargas podem apresentar preferência sobre as demais, o que em consideração ao GLD, neste método de aplicação se obtém uma vantagem por oferecer condições de realocação das cargas em horários apropriados segundo a sua relevância (SUCUPIRA, 2004).

### 3.6.2 Pontos Interiores

O método por pontos interiores consiste em uma abordagem que apresenta uma robustez numérica e uma rápida convergência dos dados. A utilização deste procedimento visa buscar soluções de otimização por meio do direcionamento das sequências estrutural do algoritmo por regiões internas (SIEBERT, 2013).

Aplicabilidade deste método no GLD consegue englobar situações em que requer adoção de programação linear e quadrática, podendo obter resultados mais adequados que os algoritmos que percorrem pontos adjacentes.

Utilizando o método dos pontos interiores, Siebert (2013), adotou como base para a realização de uma otimização de Fluxo de Potência Ótimo, utilizado para avaliar indivíduos de um algoritmo para a realização de uma alocação simultânea de reguladores de tensão e capacitores em uma rede de distribuição.

No trabalho Siebert (2013) considera-se o problema do mínimo corte de carga a ser otimizado, em que o método dos pontos internos serve como base para gerar a otimização por meio de cálculos uma solução para as variáveis do sistema respeitando restrições.

### 3.6.3 Evolução Diferencial

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED) consiste em um método de otimização relativamente simples e eficiente para funções objetivo que não são diferenciáveis ou convexas.

Virgílio (2016) aplicou o método da evolução diferencial para a solução de um problema de alocação de banco de capacitores para o gerenciamento da energia em redes de distribuição de energia elétrica trifásica. O estudo o algoritmo proposto



consiste na resolução do desequilíbrio do sistema trifásico por meio do desacoplamento de cada uma das fases. Ao propor solucionar o problema em cada uma das fases, se consegue melhor otimizar o sistema como um todo ao ser reacoplado e interligado novamente.

Vilchez Lazo (2014) aplicou o método ED, para utilização de um algoritmo heurístico para melhorar os custos devida a perdas de energia em um sistema elétrico por meio da alocação do banco de capacitores. No estudo, adotou-se três fundamentos, o aumento do banco de capacitores, retirar um banco de capacitores e transferir o banco de capacitores para uma barra superior ou inferior.

Por meio do estudo de otimização utilizando o algoritmo baseado na ED, o trabalho atingiu o objetivo de obter uma maior lucratividade por redução das perdas de energia, contribuindo para a melhora do perfil de tensão de operação do sistema VILCHEZ LAZO (2014).

#### 3.6.4 GRASP

Dentre as técnicas que abordam os métodos meta-heurísticos, o GRASP se destaca em aplicações de otimização em que se busca uma solução única no processo de busca e saída. Em seu estudo Perreira (2018), utiliza o GRASP em redes inteligentes, com o intuito de reconfigurar as mesmas para a construção iterativa de elemento a elemento do problema proposto para posterior aprimoramento com buscas das vizinhanças até a conclusão de um local melhor para as interações.

Perreira (2018), buscou por meio do estudo a melhoria dos custos da melhor forma possível da rede. Por meio do algoritmo GRASP, apresentou caminhos alternativos para estabelecer conexões entre as cargas que não pertencem as regiões em que apresentam falhas e as fontes permaneçam disponíveis e conectadas à rede. O algoritmo do estudo possibilitou a manutenção do balanço de potência elétrica da rede e minimizou as rejeições de cargas.

#### 3.6.5 PSO

A otimização por Enxame de Partículas (PSO), consiste na utilização de um enxame de partículas em que cada uma é uma solução possível para um problema de otimização. Neste tipo de melhoria, cada partícula se movimento através do

espaço de busca, ajustando as suas posições conforme a iterações entre as demais vizinhas (SIEBERT, 2013).

Para atender bem as solicitações, o PSO precisa atender cinco condições de acordo com (MILLONAS, 1994):

- Proximidade: capacidade de interagir com demais partículas;
- Qualidade: capacidade de avaliar seus comportamentos;
- Diversidade: reação a situações inesperadas;
- Estabilidade: nem todas variações ambientais devem afetar o comportamento de um agente;
- Adaptabilidade: capacidade de adequação a variação ambientais.

Em um estudo, Batista e Flauzino (2013), utilizaram o PSO para otimizar o consumo em uma residência pelo método PSO. Os autores abordaram os equipamentos elétricos da residência, buscando controlar de forma otimizada o tempo de consumo e o horário de uso de carga, deslocando o consumo pelo GLD.

Batista e Flauzino (2013), dividiram o perfil de carga em 24 seguimentos horários e estabeleceu uma matriz (24x1) para definir as condições de operações de cada equipamento a fim de diminuir os pico de consumo, levando-se em conta os padrões de vida das famílias. Com a adoção de tarifas horárias, se obteve um perfil de carga otimizada, gerando uma redução dos custos pagos pelas famílias.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste estudo teórico acerca dos fundamentos do sistema de Gerenciamento pelo Lado da Demanda, para a realização de um modelamento matemático.

Para a realização do modelamento são analisadas as técnicas usuais de gerenciamento, incluindo a redução de pico, preenchimento de vale, deslocamento de carga, conservação estratégica, e curva de demanda flexível.

Com os conhecimentos sobre os fundamentos teóricos, o modelamento matemático visa otimizar o GLD em um setor de uma siderúrgica com o intuito de minimizar os custos de utilização de energia elétrica, alocando as cargas do sistema em horários de menor tarifa e respeitando as restrições do processo produtivo.

## 5 ESTUDO DE CASO

A sinterização é um processo de aglomeração a quente de uma mistura de finos de minério, coque, fundentes e adições onde o produto resultante é o sínter, visando manter constante as características físicas, químicas e metalúrgicas apropriadas para a operação do Alto Forno.

O processo inicia-se na recepção de todas as matérias primas de fina granulometria em silos de estocagem, para que sejam dosadas e formem uma mistura homogênea. No misturador adiciona-se água, formando micro pelotas. Este material é distribuído na esteira da máquina de sínter.

A mistura do sínter é carregada sobre a esteira de grelhas e é posta a alta temperatura a partir do forno de ignição a aproximadamente 1200° C, iniciando o processo de sinterização dessa massa, que sofre combustão pelo ar succionado de cima para baixo ao longo do leito.

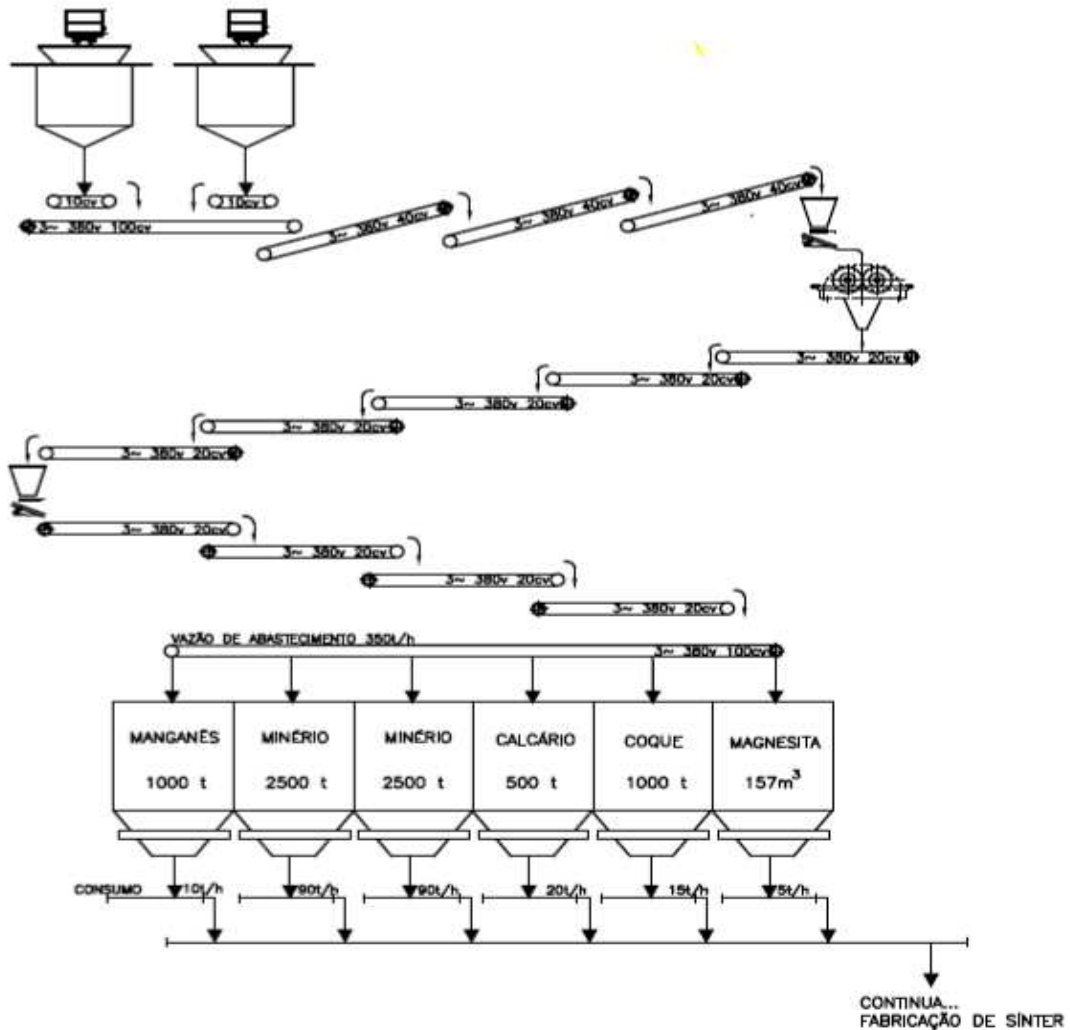
A frente de sinterização termina no final da máquina de sínter, onde é passada pelo processo de resfriamento e posteriormente pelas etapas de britagem e peneiramento, que prepara o material para ser enviado para o Alto Forno. Após esse processo forma-se o material aglomerado sólido e poroso denominado Sínter.

A sinterização é uma unidade que exerce importante papel no controle ambiental, pois é a maior consumidora de rejeitos gerados nos processos de produção da usina. As partículas finas geradas no processo são succionadas e direcionadas para o precipitador eletrostático, e o pó coletado e reutilizado no processo.

Este estudo se caracteriza pelo enfoque no gerenciamento de demanda da energia elétrica no processo de recepção de matéria prima. Quando em funcionamento, a sequência de equipamentos basicamente compostos por motores elétricos de indução trifásicos, consome uma potência de 400 KW e abastecendo cada silo individualmente com uma vazão de 350 t/h.

Por medidas de segurança operacional os silos devem permanecer com um estoque mínimo de dez vezes seu consumo instantâneo. São necessários 10 minutos para que a sequência de equipamentos altere o tipo de material e considera-se que o circuito de recepção de matéria prima tenha uma parada para manutenção de 8 horas por mês. A figura 5 ilustra o circuito de recepção de matéria prima descrito.

Figura 5 – Circuito de Recepção de Matéria-Prima da Sinterização



Fonte: Elaborada pelos Autores (2019)

Analisando a figura 5, pode-se determinar alguns parâmetros importantes para a modelagem matemática, sendo eles:

$V_{max}$  Volume máximo dos silos.  $V_{max} = [1000 \ 2500 \ 2500 \ 500 \ 1000 \ 500]$

$V_{min}$  Volume mínimo dos silos.  $V_{min} = [200 \ 500 \ 500 \ 100 \ 200 \ 100]$

$P_e$  Vazão de abastecimento dos silos, em t/h

$P_s$  Consumo de matéria prima, em t/h.  $P_s = [10 \ 90 \ 90 \ 20 \ 15 \ 5]$

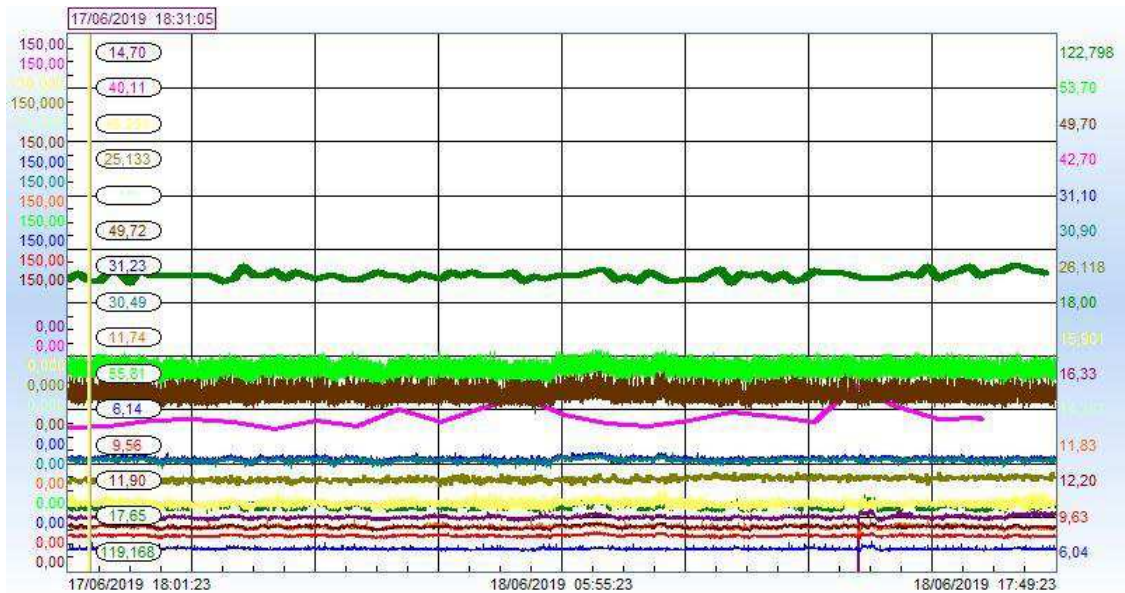
Tabela 3 – Relação de Consumo de Energia Elétrica

<b>Equipamento</b>	<b>TAG</b>	<b>Corrente de Trabalho (A)</b>	<b>Consumo de Potência (KW)</b>
Motor de Indução Trifásico	CGC-01	132,23	85,97
Motor de Indução Trifásico	CGC-02	119,16	77,47
Motor de Indução Trifásico	CGC-03	55,81	36,29
Motor de Indução Trifásico	CGC-04	49,72	32,33
Motor de Indução Trifásico	CGC-05	40,11	26,08
Motor de Indução Trifásico	BCM-01	31,23	20,30
Motor de Indução Trifásico	BCM-02	30,49	19,82
Motor de Indução Trifásico	BCM-03	25,13	16,34
Motor de Indução Trifásico	BCM-04	17,65	11,48
Motor de Indução Trifásico	BCM-05	15,35	9,98
Motor de Indução Trifásico	BCM-06	14,7	9,56
<b>TOTAL</b>		<b>438,69</b>	<b>345,62</b>

Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

O perfil de consumo diário dos equipamentos que compõem o circuito de abastecimento de matéria prima nos silos de estocagem podem ser representados conforme figura 6. A média desses valores foram considerados na tabela anterior.

Figura 6 – Perfil de consumo de eletricidade das correias transportadoras



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

O modelo tarifário a ser considerado no estudo, consiste na tarifa azul, do tipo a4 e a bandeira verde para trabalho no período úmido, os valores de demanda contratada fora de ponta equivalem a 400KW e a demanda contratada no horário de ponta é de 100KW. Os valores tarifários podem ser observados segundo a figura 7 a seguir:

Figura 7–Tarifas da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG)

A4 - 2,3 KV A 25 KV	Demanda R\$/kW				
		Consumo R\$/kWh	Consumo R\$/kWh	PATAMAR 1 Consumo R\$/kWh	PATAMAR 2 Consumo R\$/kWh
Demanda Ponta	43,85				
Demanda Fora de Ponta	13,95				
Demanda Ultrap. Ponta	87,70				
Demanda Ultrap. F. Ponta	27,90				
Cons. Ponta - P. Seco		0,53425	0,54925	0,57425	0,59425
Cons. Ponta-P. Úmido		0,53425	0,54925	0,57425	0,59425
Cons. F.Ponta - P. Seco		0,35666	0,37166	0,39666	0,41666
Cons. F.Ponta - P. Úmido		0,35666	0,37166	0,39666	0,41666

Fonte: Adaptado de CEMIG (2018)

## 5.1 Modelo Matemático de GLD Aplicado em uma Siderúrgica

Ao se propor uma solução para um determinado problema, especificamente em um processo industrial, a modelagem matemática se destaca pela possibilidade de uma formulação matemática para um problema real. Aplicando a modelagem matemática é possível por meio de algoritmos a análise de melhoria sem afetar diretamente a produtividade, ou seja, por meio de um modelo matemático se aborda melhorias a serem feitas anteriormente a sua aplicação prática, com isso, torna-se possível simular diferentes condições e com os resultados as melhorias podem ser implementadas.

O objetivo da otimização apresentada será minimizar os custos com a utilização de energia elétrica, propondo um algoritmo para alocar o horário abastecimento dos silos onde a energia elétrica tenha menor tarifa, ou seja, evitando o horário de ponta. As restrições da otimização são:

- A soma da vazão de abastecimento não deve ultrapassar 350 t/h segundo as condições operacionais;
- A massa do silo refere-se ao valor inicial contido nele ( $V_0$ ) + O valor da vazão de abastecimento – o valor de consumo.

Dessa forma, o modelo matemático de otimização proposto pode ser formulado através de equações e inequações algébricas, ou restrições de igualdade e desigualdade, como apresentado a seguir:

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^{24} C_{total}$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^6 P e_{i,t} \leq 350$$

$$V_{(s,t)} = V_0 + X - P_s$$

$$\underline{V} \leq V \leq \bar{V}$$

Onde:

$C_{total}$	Custo de utilização de energia elétrica
$\sum_1^6$	Número de silos de estocagem de matéria prima
$P e_{i,t}$	Vazão de abastecimento
$V_{(s,t)}$	Massa do silo de estocagem
$V_0$	Valor inicial a ser considerado na iteração



$X$	Variável a ser otimização pelo algoritmo
$P_s$	Vazão de consumo de matéria prima
$\underline{V}$	Limite inferior de peso do silo
$\overline{V}$	Limite superior de peso do silo

O consumo de energia elétrica aplicado na área industrial em análise considera o modelo tarifário do tipo azul, período úmido e bandeira tarifaria verde. Para se estabelecer os custos, consta na figura 7 a tarifação da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O custo de utilização de eletricidade nesse contexto, considerando a bandeira tarifária azul, pode ser representado pelo somatório das três parcelas, as parcelas de custos englobam, os custos relativos a ativa, a demanda e os custos de ultrapassagem, conforme descritos nas equações a seguir:

$$C_{ativa} = (T_{hp} \cdot Kw_{hp}) + (T_{hfp} \cdot Kw_{hfp})$$

$$C_{demanda} = (CD_{hp} \cdot D_{hp}) + (CD_{hfp} \cdot D_{hfp})$$

$$C_{ultrapassagem} = [CUD_{hp} \cdot (DM_{hp} - D_{hp})] + [CUD_{hfp} \cdot (DM_{hfp} - D_{hfp})]$$

$$C_{total} = [(C_{ativa} + C_{demanda} + C_{ultrapassagem}) \cdot (\frac{1}{1-ICMS})]$$

Onde:

$T_{hp}$	Tarifa de energia elétrica cobrada em horário de ponta
$T_{hfp}$	Tarifa de energia elétrica cobrada em horário fora de ponta
$Kw_{hp}$	Consumo de energia elétrica em horário de ponta
$Kw_{hfp}$	Consumo energia elétrica cobrada em horário fora de ponta
$D_{hp}$	Demanda contratada em horário de ponta
$D_{hfp}$	Demanda contratada em horário fora de ponta
$UD_{hp}$	Demanda de ultrapassagem em horário de ponta
$UD_{hfp}$	Demanda de ultrapassagem em horário fora de ponta
$CD_{hp}$	Tarifa de demanda em horário de ponta
$CD_{hfp}$	Tarifa da demanda em horário fora de ponta
$CUD_{hp}$	Tarifa de ultrapassagem de em horário de ponta
$CUD_{hfp}$	Tarifa de ultrapassagem de em horário fora de ponta

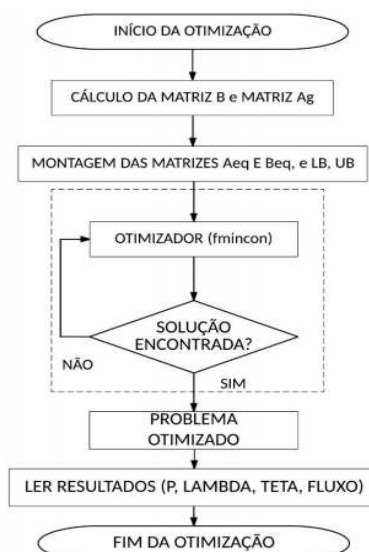
$DM_{hp}$	Demanda medida em horário de ponta
$DM_{hfp}$	Demanda medida em horário fora de ponta
ICMS	Imposto sobre operações relativas

Através dos equacionamentos descritos, é possível estabelecer os custos envolvidos no processo considerando as condições que influenciam na formação das tarifas a serem incididas no consumo.

Por meio do modelamento, o estudo de caso do trabalho optou por utilizar a otimização por pontos interiores, a escolha de aplicação do método no algoritmo se deu pela utilização do estudo sequencial interno do processo a ser otimizado, com o propósito de proporcionar uma representação contínua, considerando as restrições do problema.

Para analisar os resultados foi desenvolvido um algoritmo usando uma ferramenta do Matlab denominada Fmincon. Essa ferramenta possibilita encontrar o ponto ótimo de uma função objetivo inserindo restrições de igualdade e desigualdade. A estrutura do programa de otimização é iniciada com o cálculo da matriz 'A' e 'B', após é apresentada a forma das matrizes Aeq, Beq e definido os limites Lb e Ub, representando os limites inferiores e superiores das restrições. Com os parâmetros definidos a otimização da função Fmincon definida por pontos interiores é iniciada conforme ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Estrutura de otimização



Fonte: Adaptada de Matlab (2019)

O processo de otimização foi desenvolvido um algoritmo usando uma ferramenta do Matlab denominada Fmincon, o algoritmo utilizado encontra-se no anexo A do trabalho, em que estão dispostos os procedimentos de cada etapa. Essa ferramenta possibilita encontrar o ponto ótimo de uma função objetivo inserindo restrições de igualdade desigualdade.

Para utilizar o Fmincon são necessárias as seguintes linhas de comando:

$$\begin{aligned} \text{opção} &= \text{optimset}('Algorithm','interior - point') \\ X &= \text{fmincon}(@\text{custo}, x0, A, B, Aeq, Beq, LB, uB) \end{aligned}$$

A primeira linha ativa o método de otimização utilizado pelo Fmincon, sendo escolhido para o trabalho em questão o método de pontos interiores. Na segunda linha são declarados os parâmetros de otimização, onde 'X' é a variável que será gravada o resultado, 'x0' os valores iniciais para interação, '@custo' é o nome do arquivo.m onde a função a ser otimizada está escrita, 'Aeq' a matriz dos coeficientes das restrições de igualdade, 'Beq' o vetor dos termos independentes das restrições de igualdade, 'A' a matriz dos coeficientes das restrições de desigualdade e 'B' o vetor dos termos independentes das restrições de desigualdade. Além disso, é possível inserir limites superiores e inferiores, denominados de upper bounds (vetor UB) e lower bounds (vetor LB). (MATLAB, 2019).

## 5.2 Resultados e Discussões

Com objetivo de verificar a eficiência do algoritmo de otimização aplicado para gerenciar o abastecimento silos de estocagem de matéria prima, foram realizadas várias simulações no MatLab considerando diferentes situações. Os valores representativos para a simulação irão descrever quatro condições distintas, sendo elas:

- Manter o valor de 90% de massa em cada silo, considerando um valor inicial de 20% em relação a sua capacidade nominal.
- Aplicar a restrição de massa mínima em 20%, considerando o valor inicial de iteração em 30%.
- Com restrição de massa mínima em 20%, considerar 50% o peso inicial dos silos.

- Iniciar a simulação com valor de 90% de massa inicial e restringir que o peso mínimo não atinja 20%.

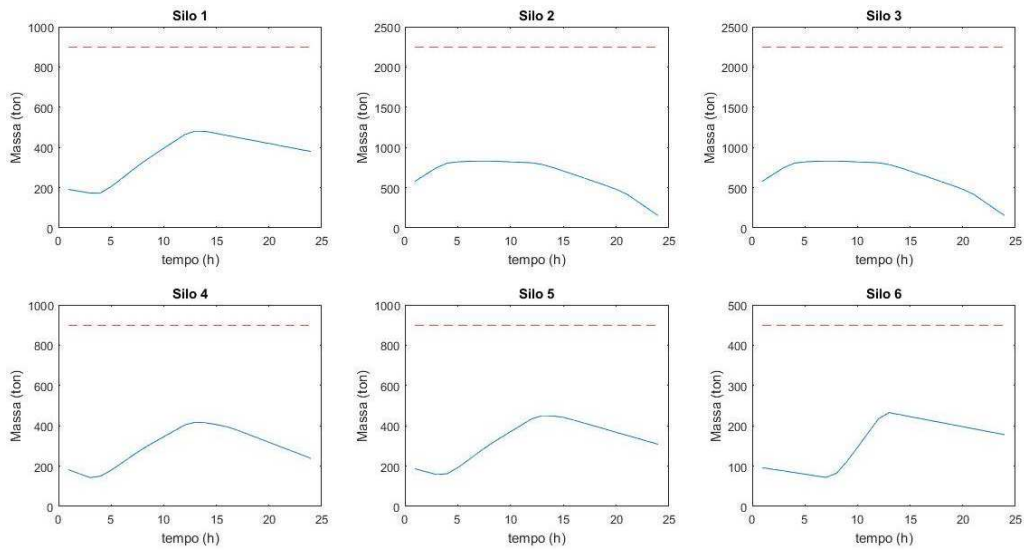
### 5.2.1 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 01

A restrição mínima adotada de 90% significa que o objetivo do modelamento matemático é manter os silos em 90% de sua capacidade nominal de estocagem. Caso o mesmo atinja os valores de massa de 10% e é desejável realizar o enchimento até que o mesmo atinja 90% da capacidade. Com isso no estudo, considera a simulação do enchimento dos silos considerando o consumo de energia elétrica a ser gasta para realizar procedimento.

A seguir é demonstrado os resultados da otimização com valor inicial de interação em 10% da capacidade nominal do silo e restringindo o peso mínimo para 90%, cenário que objetiva manter um nível mais alto de estocagem e simula o processo completo de abastecimento. Foram considerados o modelo tarifário azul, com bandeira verde, demanda contratada de 400 KW para o horário de ponta e 100 KW para horário fora de ponta.

A condição estabelecida de massa mínima em 10% da capacidade nominal foi satisfeita e representada no gráfico 1 a seguir. Pode-se observar que a linha vermelha tracejada é o valor desejado do peso do silo, mas considerando uma janela de simulação de 24 horas e a capacidade de estocagem ser alta, levaria um tempo maior para que o objetivo seja atendido.

Gráfico 1 – Massa dos silos de estocagem em 24 horas

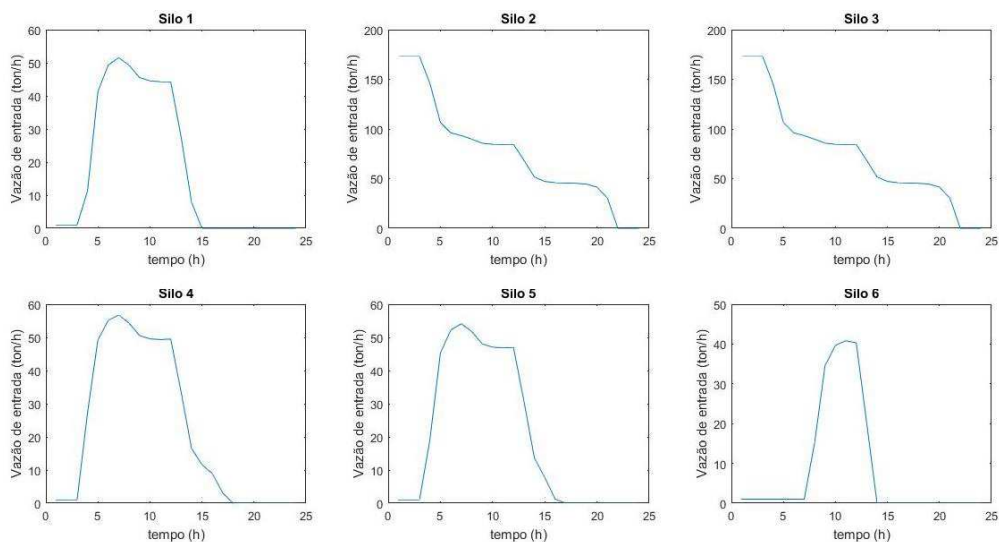


Fonte: Elaborada pelos Autores (2019)

Nos dados do gráfico 1, nota-se que os valores dos silos aproximam das condições de mínimo de 10% define os valores para os silos 2 e 3, evidenciando a condição de proximidade dos limites mínimos.

O gráfico 2 demonstra a distribuição da vazão de abastecimento entre os silos de acordo com a otimização da função de custo. Percebe-se a prioridade de abastecimentos para horários onde o custo de energia elétrica é mais barata, observando valores contratuais de tarifas.

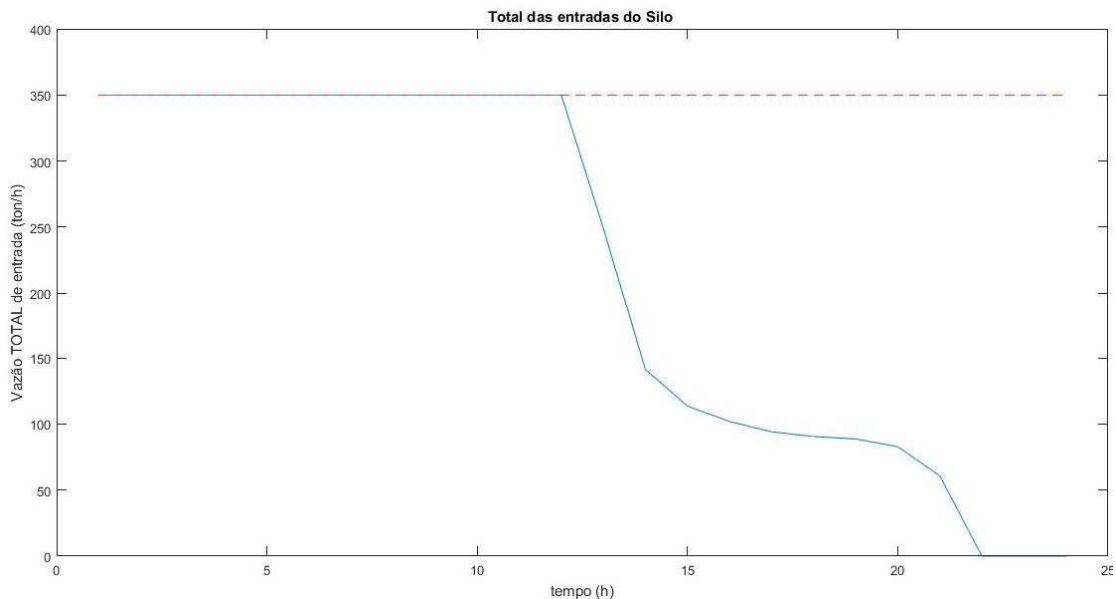
Gráfico 2 – Vazão de abastecimento dos Silos



Fonte: Elaborada pelos Autores (2019)

Observa-se que uma das restrições do problema de otimização é que a somatória das vazões de abastecimento não ultrapasse 350 t/h, condição satisfeita e comprovada na gráfico 3 a seguir.

Gráfico 3 – Vazão total de abastecimento dos Silos



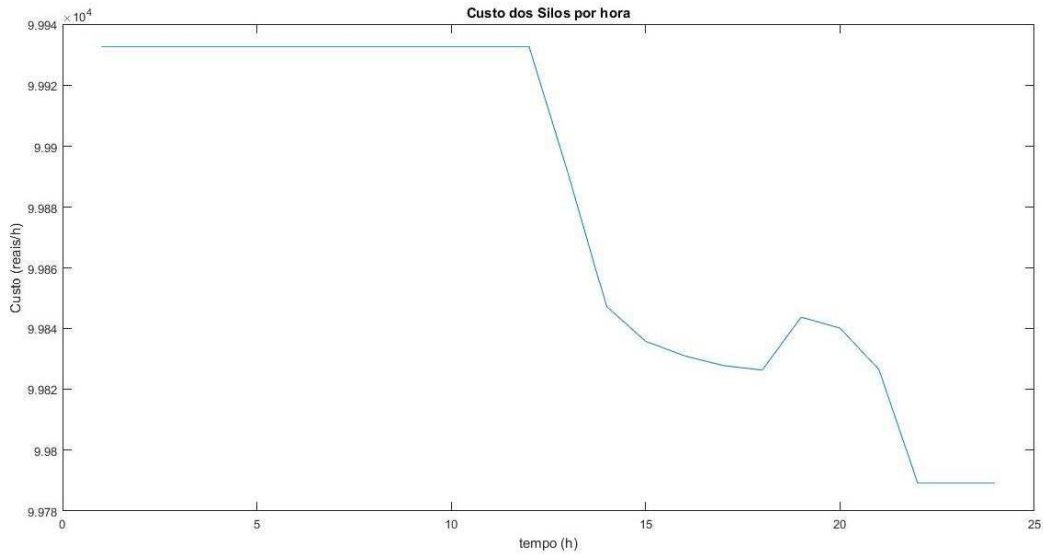
Fonte: Elaborada pelos Autores (2019)

O perfil de consumo de energia elétrica pode ser demonstrado no gráfico 4. Observe que houve consumo de eletricidade no horário de ponta devido à massa dos silos 2 e 3 atingirem valores mínimos nesse intervalo de tempo. Os dados mostrados nos gráficos 2 e 3, mostra que as massas dos silos chegam a valores abaixo do mínimo estipulado de 10%. No entanto, no Matlab, os valores reais chegam próximos ao mínimo mas não ultrapassando os valores.

Os dados simulados representam um período maior de tempo e considerando a vazão de abastecimento em valores máximos quando os níveis de carga aproximam das mínimas.

No gráfico 4 são apresentados os custos ao decorrer do tempo dos silos, quanto maiores os abastecimentos dos silos maiores são os custos decorrentes do abastecimento.

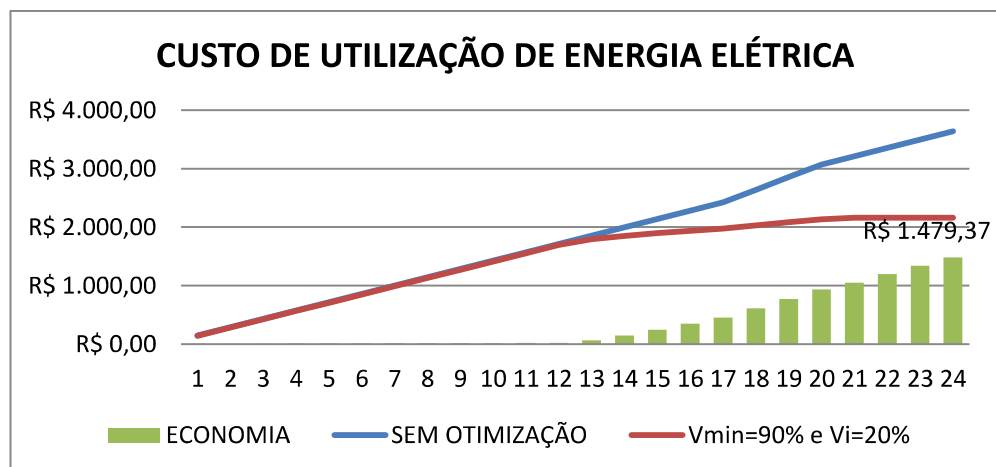
Gráfico 4 – Custo em função do tempo para os silos



Fonte: Elaborada pelos Autores (2019)

Avaliando a comparação entre o custo da aplicação do algoritmo proposto e a condição sem nenhum controle onde os equipamentos ficam ligados a potência nominal durante todo período de tempo, observa-se uma considerável redução no valor pago em utilização de energia elétrica. A otimização proporcionou uma economia diária de R\$1.479,37 reais representando uma redução de 40% em relação ao valor que seria pago na fatura de energia elétrica, conforme representado no gráfico a seguir:

Gráfico 5 – Custo de Utilização da Energia Elétrica



Fonte: Elaborada pelos Autores (2019)

### 5.2.2 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 02

Com o objetivo validar a eficiência do algoritmo de otimização em diversas situações, foram simulados três cenários distintos. A primeira restrição é que a massa de cada silo, expressa em toneladas, não atinja o valor mínimo de 10% relativo a sua capacidade de estocagem. A segunda restrição define que a soma da vazão de abastecimento não exceda 350 t/h.

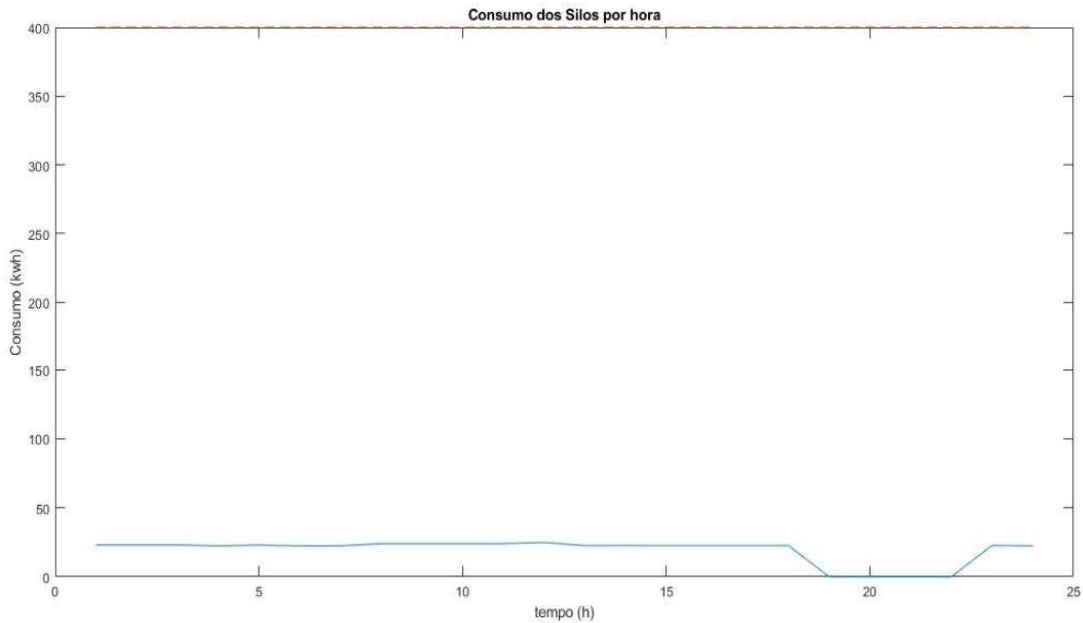
Os gráficos a seguir apresentam os resultados considerando os silos operando em três situações diferentes, operando com peso inicial em 90%, 50% e em 30%. Por meio da simulação realizada, é possível verificar as condições do consumo em cada caso abordado.

A seguir, os gráficos de 6 a 10 apresentam os resultados obtidos pelos algoritmos para a otimização acima considerando o peso inicial em 90% da capacidade do silo. O silo inicialmente está com uma massa de 90%, praticamente cheio e não necessita de muito abastecimento nessa condição visto que ele pode atingir até 10% de sua capacidade nominal. Ao simular um cenário de esvaziamento do silo, os silos podem variar as quantidades de massa dos valores de 90% até o mínimo de 10%.

Os dados do gráfico 6 demonstram que com a otimização o consumo se mantém constante ao longo do tempo, no entanto no intervalo próximo ao horário de pico, o abastecimento dos silos é interrompido devido as condições de restrição satisfeitas e maiores custos tarifários. Observa-se também que um baixo consumo em utilização de energia, pois o silo está praticamente cheio.



Gráfico 6 – Consumo dos Silos em kW/h com peso inicial de 90%

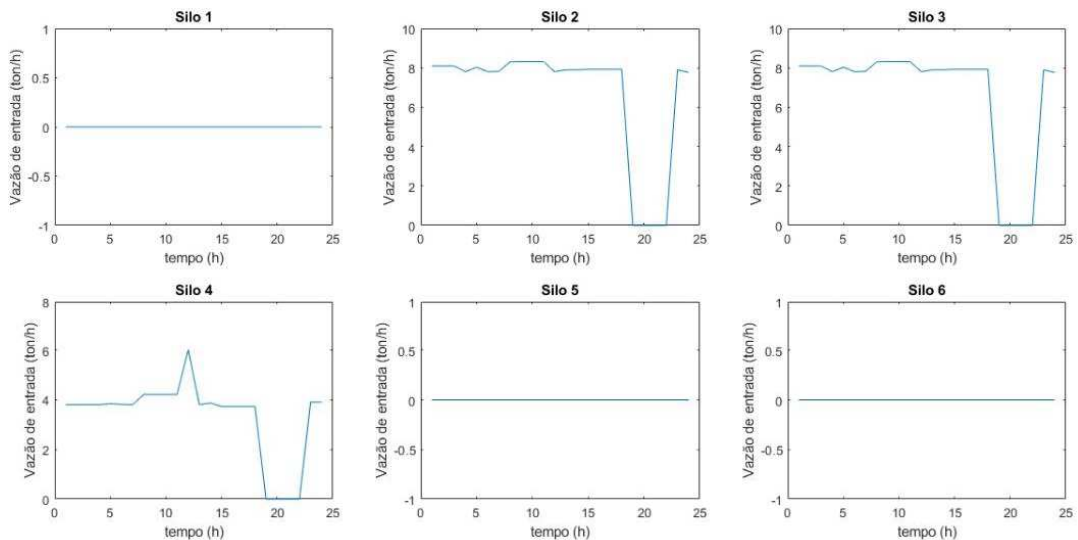


Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

Por meio do gráfico 7 apresentado, os dados expõem as condições de vazão dos silos ao decorrer do tempo. Para manter a produção em trabalho otimizado, os silos 2, 3 e 4 mantêm a vazão de abastecimento em níveis mínimos para atender a produção, sendo os demais mantendo-se sem trabalho para eventuais solicitações.

Alguns silos no gráfico 7 a seguir, ficam em níveis constantes, evidenciando níveis baixos de abastecimento sendo necessários e os mesmos apresentando baixa vazão.

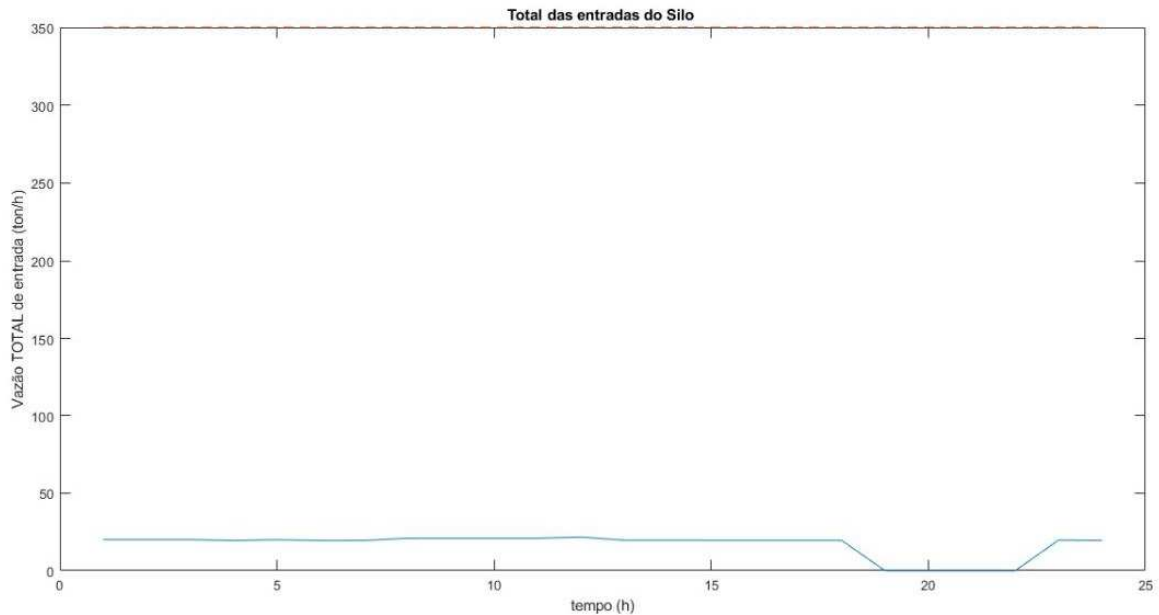
Gráfico 7 – Vazão de Abastecimento dos Silos com peso inicial de 90%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

Os dados obtidos no gráfico 8 produzem como resultado da soma de cada silo, a vazão total de abastecimento. A quantidade mantém-se constante no decorrer do tempo mas reduzindo nos períodos de picos demonstrando a eficiência do algoritmo proposto.

Gráfico 8 – Vazão de Abastecimento dos silos com peso inicial de 90%

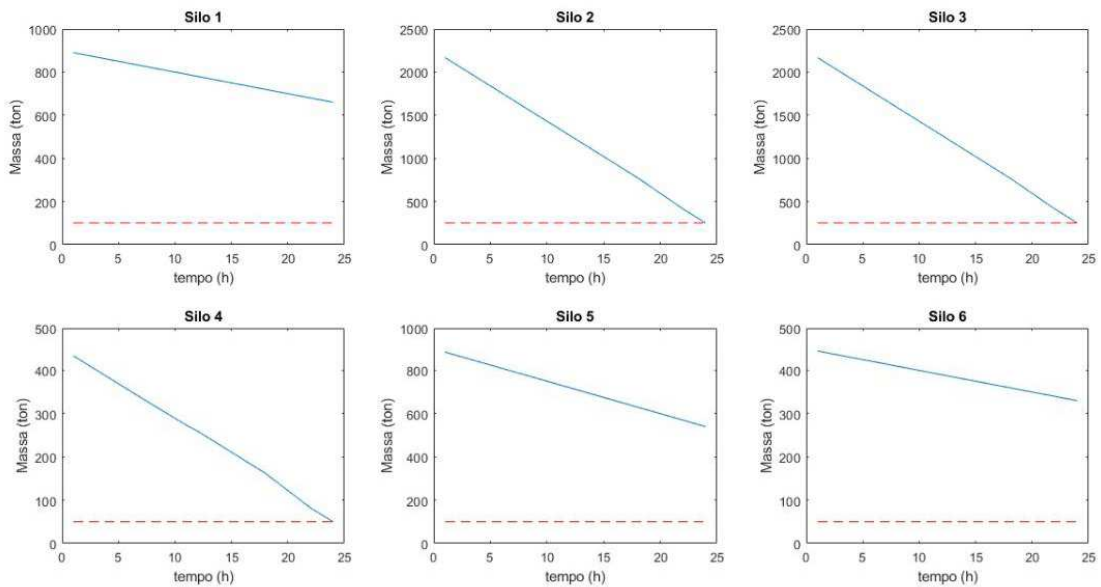


Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

As massas presentes nos silos no decorrer do tempo, estão apresentadas no gráfico 9 a seguir. Os valores se reduzem ao longo do tempo por motivo que o valor mínimo aceitável representa 10% da capacidade de estocagem de cada silo e a situação atual é acima desta. Os silos 2, 3 e 4 apresentam maiores valores de redução devido a vazão de consumo no processo ser mais elevada. Os horários em que são geradas as reduções de consumo, acabam sendo suficientes para que os mesmos completem a alimentação de forma eficiente para atender a produção.

Nos silos 1, 5 e 6 as massas não sofrem tamanha oscilação devida a baixa utilização dos mesmos no processo produtivo, ou seja, a demanda de consumo dos insumos contidos nesses silos representam menor taxa de utilização em relação ao produto final.

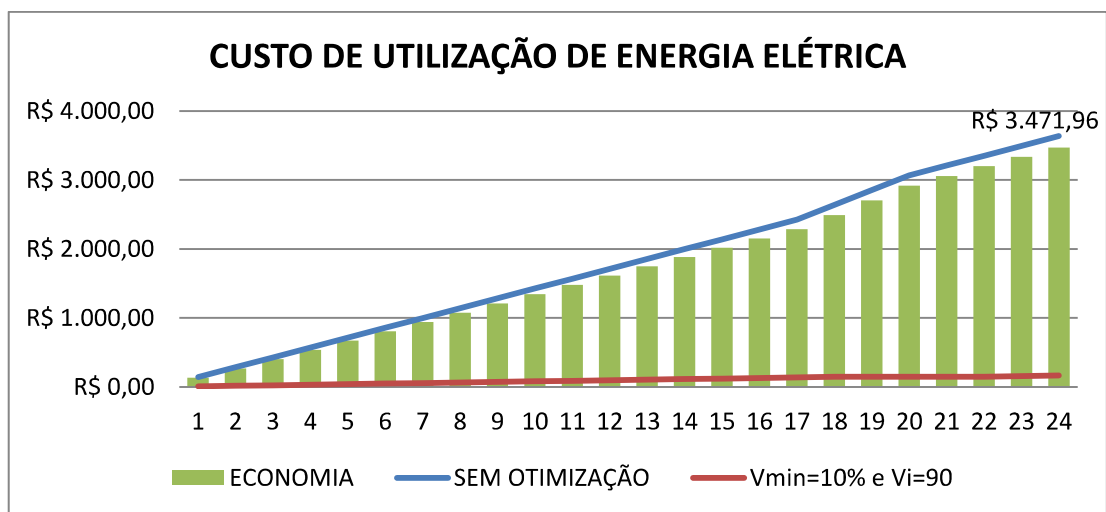
Gráfico 9 – Massa em toneladas dos Silos com peso inicial de 90%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

Analisando os resultados obtidos, considera-se que o circuito de abastecimento se manteria em funcionamento mesmo com os valores nominais dentro do desejado. Diante disso pode-se fazer a comparação e verificar que a aplicação do modelo matemático proporcionou a economia diária de R\$ 3.471,96 reais conforme representado no gráfico 10.

Gráfico 10 – Custo de Utilização da Energia Elétrica



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

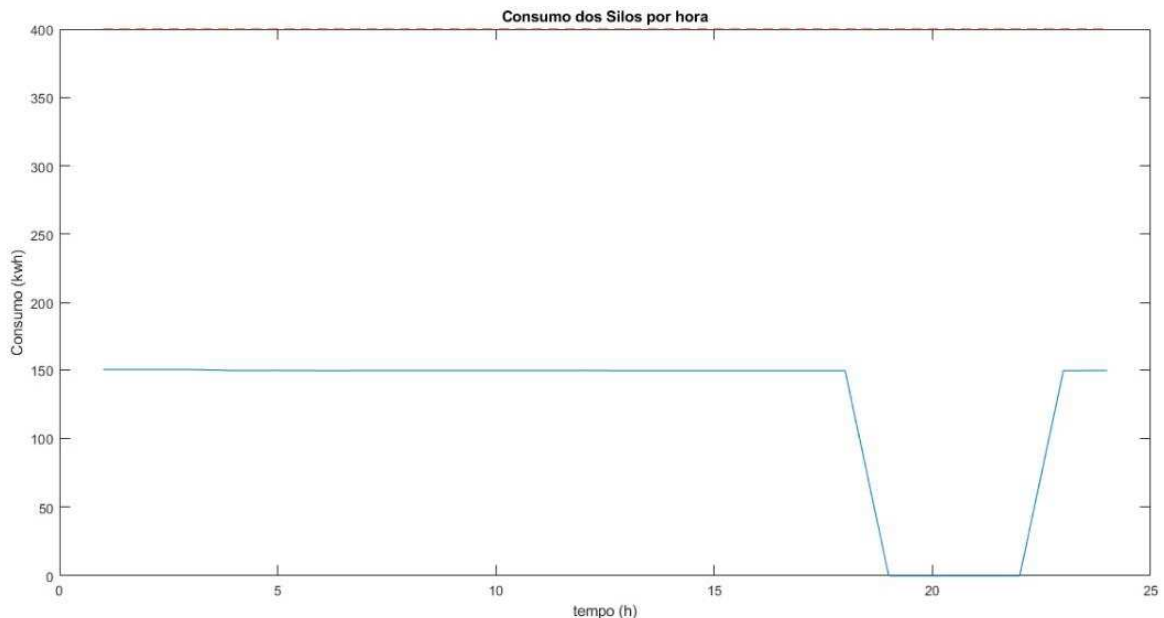
### 5.2.3 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 03

Considerando uma otimização para um o peso inicial em 50% da capacidade do silo e 10% de limite de peso mínimo, os dados obtidos estão dispostos nos gráficos 11 a 15 a seguir. O gráfico 11 apresenta o perfil de consumo de energia elétrica equivalente aos dados para o cenário com valor inicial de massa dos silos em 50% do valor de estocagem.

Observa-se que o algoritmo se manteve eficiente com essa simulação, permitindo que os valores desejados ficassem dentro das restrições e otimizando o custo de utilização de energia elétrica. Novamente foi possível desligar os equipamentos do circuito de abastecimento no horário de ponta, condição desejável.

A restrição mínima de 10% quer dizer que o objetivo do modelo matemático é fazer com que o silo não fique abaixo de 10% de sua capacidade nominal. No cenário simulado, o esvaziamento dos silos com 50% da capacidade de massa ocorre até os valores próximos ao nível mínimo de 10%.

Gráfico 11 – Consumo dos silos em KW/h com peso inicial de 50%



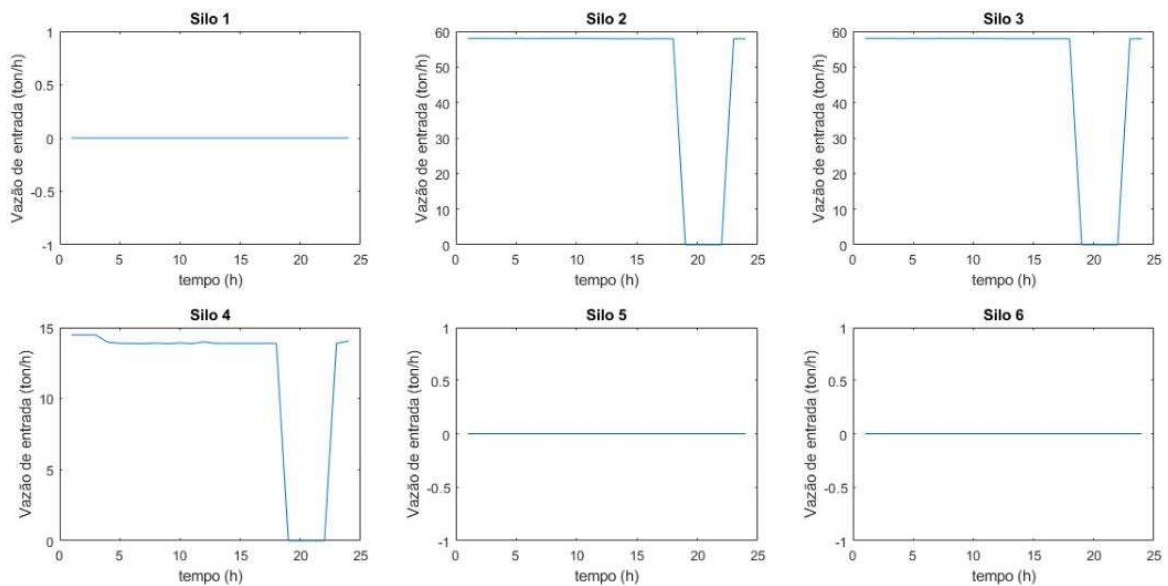
Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 12 estão dispostas as condições de vazão de entrada de material nos silos. Devido ao peso inicial de 50% da capacidade nominal, a necessidade de alimentação se torna maior do que para 90% inicial. A maior alimentação deve-se a necessidade de manutenção do nível estabelecido como parâmetro de simulação.

Os silos 2, 3 e 4, são abastecidos com uma vazão pouco inferior a de consumo devido a alta taxa de utilização destes para a produção.

Os silos 5 e 6 no gráfico 12, apresentam baixo consumo de material, por isso, a necessidade de abastecimento é baixa para estes casos, apresentando valores baixos de vazão.

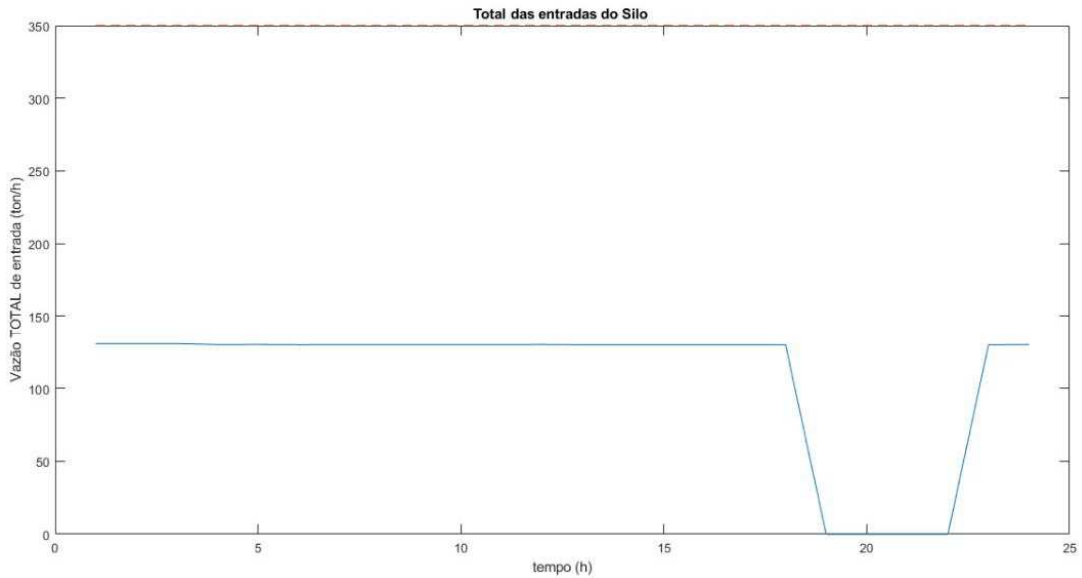
Gráfico 12 – Vazão de abastecimento dos silos com peso inicial de 50%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 13 estão dispostos somatória das vazões de abastecimento dos silos que compõe a planta. Os valores permanecem constantes, sofrendo reduções de valores quando os custos de enchimento se elevam devida as condições tarifárias de energia elétrica.

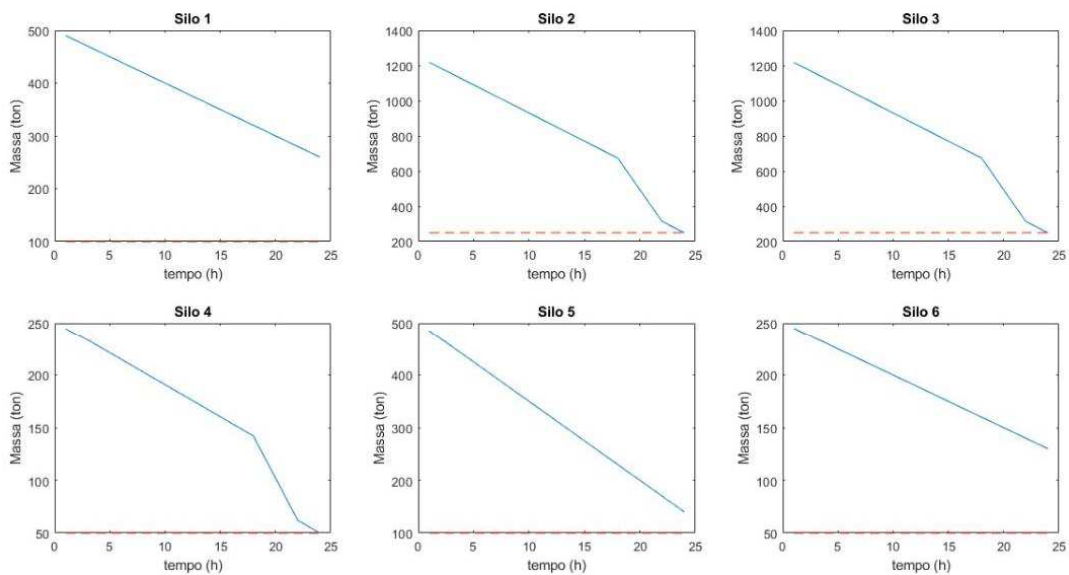
Gráfico 13 – Vazão de entrada dos silos com peso inicial de 50%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 14 estão dispostos às massas dos silos nas condições definidas, onde a condição inicial de carga é 50% da capacidade. Os níveis decaem em maior velocidade quando diminui as vazões de alimentação e apresentam quedas mais bruscas de massa nos períodos de redução do consumo de energia elétrica.

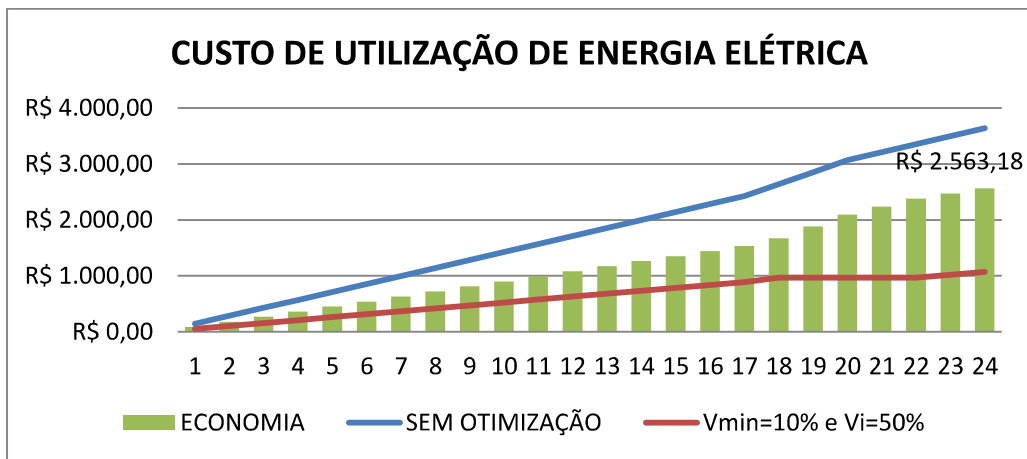
Gráfico 14 – Massa em toneladas dos Silos com peso inicial de 50%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 15 a seguir estão dispostos os custos a serem considerados para as condições de peso inicial de 50%. Analisando os resultados, a aplicação do modelo matemático demonstrou eficiente para o cenário simulado. Houve o enfoque em evitar o período de maior tarifa e atendeu as condições de restrição propostas. A otimização proporcionou uma economia diária de 2.563,18 reais. Em consideração ao cenário de 90% da capacidade inicial de massa, neste caso os valores de consumo de energia elétrica aumentou devida a necessidade de maior abastecimento.

Gráfico 15 – Custo de Utilização da Energia Elétrica



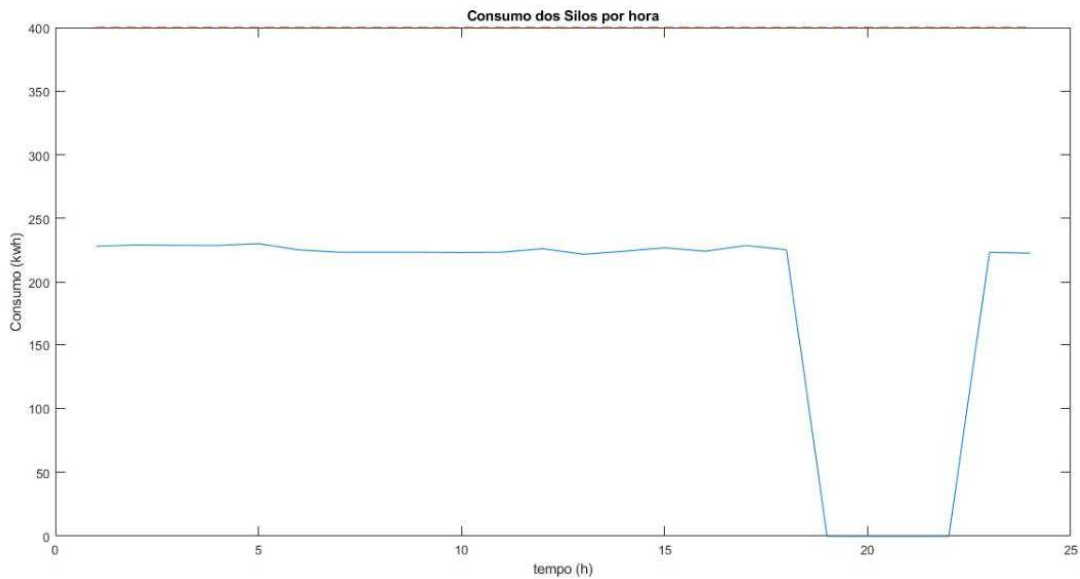
Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

#### 5.2.4 Modelo Matemático aplicado ao Cenário 04

Nas condições de otimização considerando a massa inicial em 30% da capacidade do silos, os dados são apresentados nas condições a seguir nos gráficos de 16 a 20.

O gráfico 16 apresenta o perfil de abastecimento dos silos em toneladas por hora. Observa-se que a vazão de abastecimento aumentou em comparação com as simulações anteriores devido aos parâmetros a serem satisfeitos. Os valores para este nível de produção são maiores para a manutenção da otimização, contudo permitiu relocar as carga para horário fora de ponta.

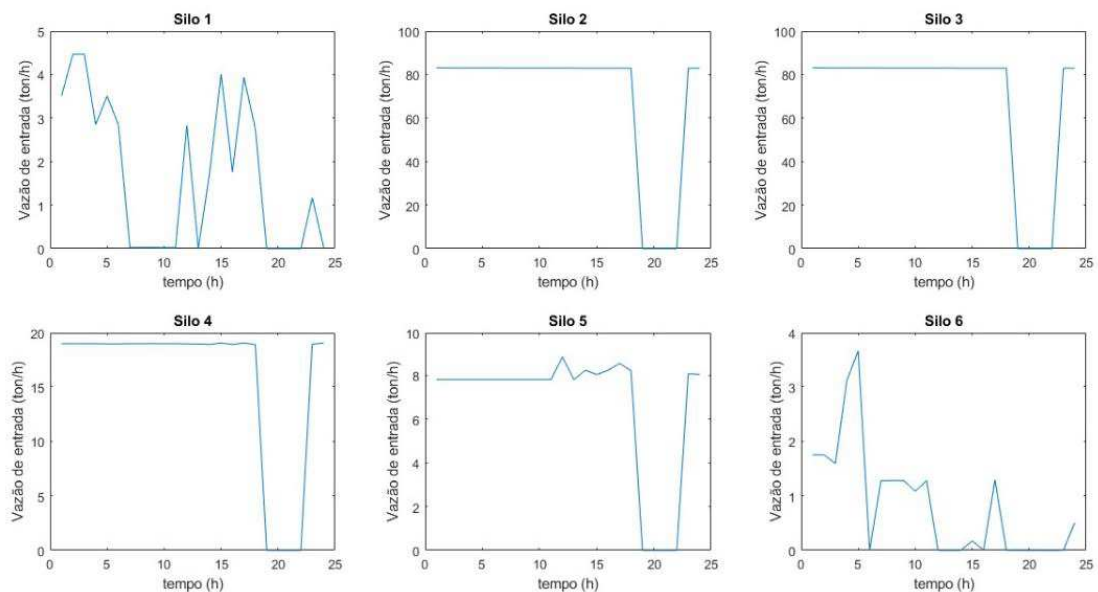
Gráfico 16 – Consumo dos silos com peso inicial de 30%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 17 estão dispostas as condições de vazão de entrada de material nos silos, devido a menor quantidade de peso inicial a necessidade de alimentação se torna maior. Devido seu consumo ser maior, o enfoque de abastecimento está nos silos 2, 3 e 4, atendendo valores mínimos para os demais. Os silos 1, 5 e 6 apresentam uma vazão mais inconstantes, mas observando a faixa do gráfico observa-se que o impacto da variação do processo é baixo.

Gráfico 17 – Vazão de entrada dos silos com peso inicial de 30%

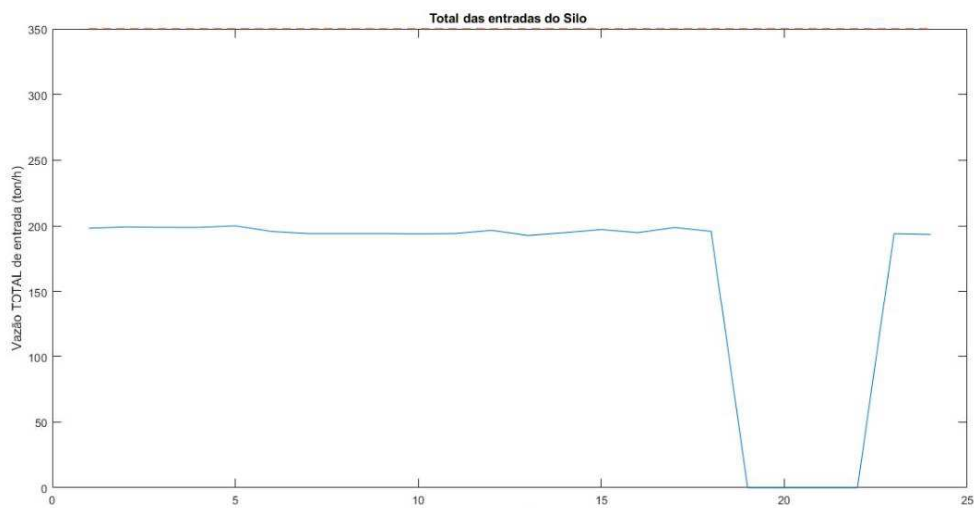


Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)



No gráfico 18 estão dispostos as vazões totais de simulação representando a somatória de cada silo. Embora cada silo tenha apresentado oscilações, na soma das vazões os valores mantem-se constantes respeitando dessa forma a principal função objetivo do algoritmo.

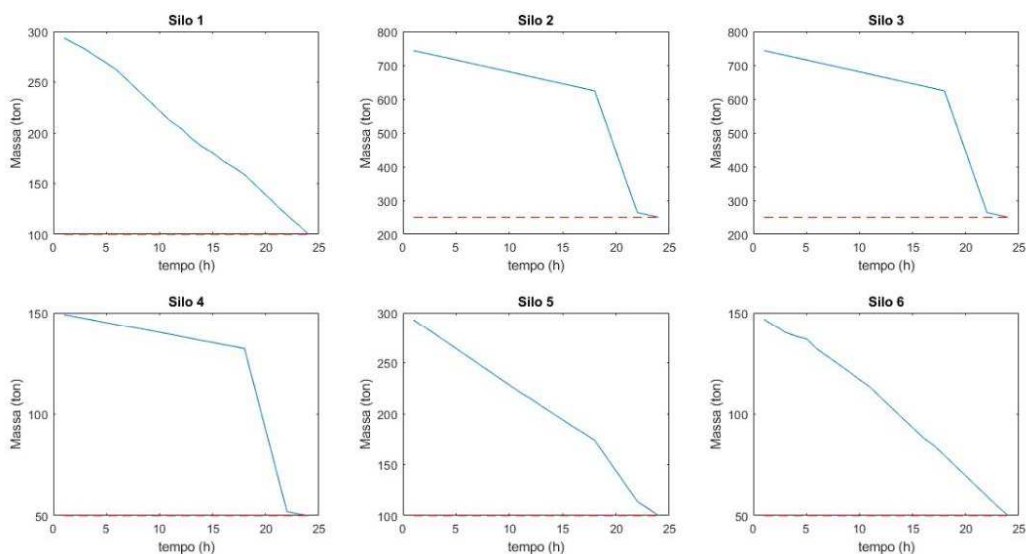
Gráfico 18 – Vazão de entrada total dos silos com peso inicial de 30%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 19 estão dispostos as massas dos silos nas condições dadas, os mesmos apresentam quedas mais bruscas de quantidade nos períodos de redução do consumo, os valores de reduções mais bruscas são observadas nos silos 2, 3 e 4, devida a condição inicial de carga de 30% da capacidade, os níveis decaem em maior velocidade quando diminui as vazões de alimentação.

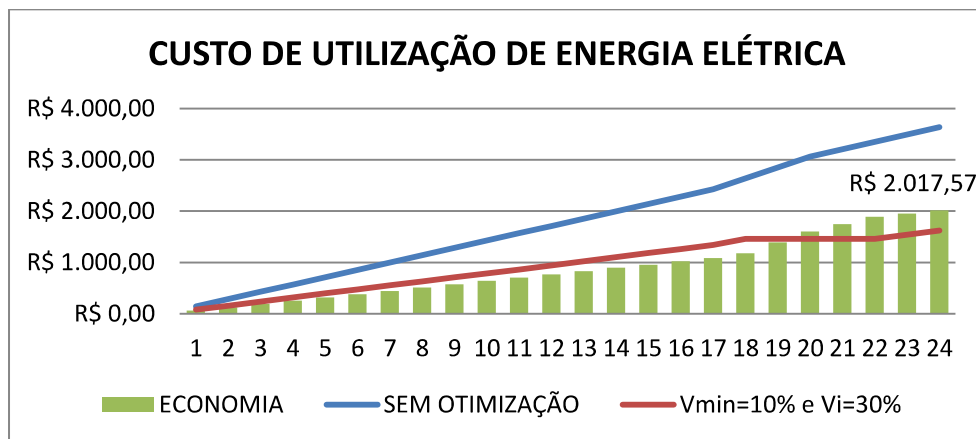
Gráfico 19 – Massa em dos Silos com peso inicial de 30%



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

No gráfico 20 a seguir estão dispostos os custos a serem considerados para as condições de peso inicial de 30%. Os valores obtidos são maiores em comparação dos demais níveis analisados devida a necessidade de maior vazão de matéria-prima. A aplicação do modelo matemático demonstrou eficiente em todas as condições propostas, obedecendo à função objetivo e restrições definidas. Na análise o algoritmo proporcionou uma economia de R\$ 2.017,57 reais por dia.

Gráfico 20 – Custo de Utilização da Energia Elétrica



Fonte: Elaborado pelos Autores (2019)

As simulações realizadas, mostraram-se eficientes em termos de redução dos custos para os três valores abordados de quantidades iniciais de massas nos silos, os resultados de economia se mostraram maiores para casos em que a massa inicial é maior devida a baixa necessidade de abastecimento. Os resultados evidenciam que os valores de massas de 90%, gera uma maior economia até mesmo com relação ao valor menor de 50%, apresentando assim, uma maior otimização em relação a redução de custos obtida.

Ao trabalhar com uma massa maior os valores de custos relativos a necessidade de reabastecimento são menores e por isso, a economia obtida é maior.

Ao deslocar o consumo nos horários de pico, a otimização se mostrou eficiente por gerar uma economia nos custos e principalmente por manter em níveis satisfatórios as restrições existentes no problema proposto.

### 5.2.5 Sugestões de Trabalhos Futuros

Para aprofundamento sobre os aspectos estudados e melhoria do GLD são sugeridos os seguintes aspectos para trabalhos futuros:

- Ampliação do estudo do modelamento matemático do GLD para demais áreas industriais;
- Realizar simulações sobre o processo estudado em uma frequência mensal para verificação da eficiência do modelamento proposto.

## 6 CONCLUSÕES

No trabalho abordou-se a melhoria da eficiência do consumo de energia elétrica no setor de recebimento de matéria-prima da sinterização de uma siderurgia, adotando o Gerenciamento pelo Lado da Demanda como método de otimização do consumo. Para avaliar a aplicabilidade de um programa GLD no setor industrial propõe-se um modelo matemático para melhorias de consumo.

Observou-se na abordagem desse trabalho que as implementações de simulações e de modelamentos matemáticos consistem em práticas usuais de melhoria do gerenciamento pelo lado da demanda. A opção pela utilização do modelamento matemático decorre devida a facilidade de se estudar uma solução do problema proposto utilizando métodos de aperfeiçoamento em diferentes formas de operacionais, realizando uma simulação de condições práticas para posterior aplicação, oferecendo condições de análise de melhorias a serem posteriores implementadas.

Para fundamentar o trabalho, o modelo matemático proposto foi inspirado nos modelos apresentados na literatura, bem como as possibilidades de alterações para melhorias dos custos de consumo de energia elétrica. Dentre os métodos de modelamento matemático utilizou-se o algoritmo baseado no método dos pontos internos com o propósito de analisar as condições de cada silo para obter uma melhoria do processo como um todo.

Dentro da metodologia adotada tornou-se possível a abordagem das diferentes condições operacionais dos silos, simulando melhorias no deslocamento do consumo para horários em que os custos tarifários sejam menores. Os dados considerados, constavam de simulações em que as cargas de massas iniciais dos silos apresentavam valores iniciais de 90%, 50% e 30%.

Ao considerar as condições operacionais dos silos, os dados mostrados apresentaram uma maior eficiência na melhoria do consumo em condições de maior carga inicial de matéria-prima, o fato se deve a menor necessidade de alimentação contínua, mantendo uma vazão de alimentação dos silos em menores valores.

Além das condições de eficiência para o carregamento inicial em maiores valores, as simulações de economia evidenciaram, que quanto maior a carga maior

a economia gerada, pois, ao otimizar o abastecimento, a necessidade de carregamento para manter os níveis de produção se tornam menores.

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que nas condições estabelecidas do método matemático de otimização, os dados obtidos mostraram-se satisfatórios, gerando uma economia considerável no processo industrial simulado, evidenciando a capacidade de programas de GLD na minimização de custos de energia elétrica no setor industrial.

## REFERÊNCIAS

ALBADI, M. H.; EL-SAADANY, E. F.; **Demand response in electricity markets: an overview**. IEEE – Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-5. Jun. 2007.

ALBUQUERQUE, F. O. **Otimização Robusta Aplicada à Contratação de Energia Elétrica Considerando a Incerteza na Demanda Futura**. São José dos Campos-SP. 46f. 76, 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Despacho Nº 1.365, de 5 de maio de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/dsp20151365.pdf>>, Acesso em: 21 de jan. 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Resolução n, 414 de 9 de setembro de 2010. 2010**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>, Acesso em: 22 de jan. 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Resolução n, 456 de 29 de Novembro de 2000. 2000**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2000456.pdf>>, Acesso em: 21 de jan. 2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, **Regulamentação da Conta de Desenvolvimento Energético – CDE – Decreto nº 9022/2017**. 2017. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2017/062/resultado/ntecnica\\_proret\\_cde\\_v1\\_-\\_pos\\_ap\\_62\\_-\\_anexo\\_iii\\_-\\_minuta\\_ren.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2017/062/resultado/ntecnica_proret_cde_v1_-_pos_ap_62_-_anexo_iii_-_minuta_ren.pdf)>. Acesso em: 19 de fev. de 2019.

ANEEL. **Site da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Múltiplos acessos em 2019.

ARAUJO, T. F. **Despacho Estocástico para Sistemas Elétricos de Distribuição com Geração Fotovoltaica**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica: Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. 189 p Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica).

BATISTA, O. E.; FLAUZINO, R. A. **Medidas de Gestão Energética de baixo custo como estratégia para redução de custos com energia elétrica**. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 7, nº 4, out-dez/2012, p. 117-134.  
BECKER, Taise Vanessa. **Optimization of Demand and Energy Consumption of the Federal Technological University of Paraná - Campus Medianeira**. 2014.

Pages 66. Monograph (Production Engineering). Federal Technological University of Paraná, Medianeira 2014.

CAMPOS, A. **Gerenciamento pelo Lado da Demanda: Um Estudo de Caso**. Programa de Pós-Graduação em Energia: São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004. 94p Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

CAVALHEIRO, D. **Método de Previsão de Demanda Aplicada ao Planejamento da Produção de Indústrias de Alimentos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica: Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 130p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica).

CAMARGO, C. **Gerenciamento pelo Lado da Demanda: Aspectos técnicos, econômicos, ambientais e políticas de conservação de energia**. Editora Univali. 2011.

CEMIG. **Modulação de Carga**. Disponível em < [http://www.cemig.com.br/pt-br/a\\_cemig/nossos\\_negocios/Paginas/Modulacao\\_Carga.aspx](http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/nossos_negocios/Paginas/Modulacao_Carga.aspx)>. Acesso em Dez. de 2018.

CHEN, Z.; WU, L.; FU, Y. **Real-Time Price-Based Demand Response Management for Residential Appliances via Stochastic Optimization and Robust Optimization**. IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 3, No. 4, 2012.

DELGADO, R. R. (1985). **Demand-Side Management Alternatives, Proceedings of the IEEE**, vol. 73(10), p. 1471-1488.

DIAS, R. A. **Impactos da substituição de equipamentos na conservação de energia**. Guaratinguetá, 1999. Cap.1, p.18-23. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Estatística do Setor Elétrico Brasileiro**. Disponível em <<http://epe.gov.br>>. Acesso em: 16 de Agosto de 2018.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001\\_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026\\_VF\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf)>, Acesso em: 25 de mar. 2019.

GOULART, J. A. G. **Efeitos de Programas de Resposta à Demanda e da Microgeração nas Redes de Distribuição**. Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2015.

GUILHERMINO, G. N. **Métodos univariados e multivariados para previsão da demanda de energia elétrica em curto prazo: um estudo comparativo**. 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em < <https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 18 de Outubro de 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Medidores inteligentes**. Disponível em < <https://www.iea.org/> >. Acesso em: 12 de Setembro de 2018.

MATHLAB. **Site do software Matlab**. Disponível em: <<https://la.mathworks.com/>>. Acesso em: 04 de maio de 2019.

METAHEURISTICS NETWORK. **Site Metaheuristics Network**. Disponível em: <<http://www.metaheuristics.net>>. Acesso em 16 de junho de 2019.

MILLONAS, M. M. **Swarms, phase transitions, and collective intelligence**. In: **ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO**. Proceeding of the Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. 1994. v. 17, p. 417–417.

MOHAGHEGHI, S.; RAJIL, N. **Dynamic Demand Response: A solution for improved energy efficiency for industrial customers**. EEE Industry Applications Magazine. vol. 21, Issue:2, 2014.

PELIELO, G. **Redes inteligentes**. Disponível em < [https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes10161/16\\_1/smartgrid/#introdu%C3%A7%C3%A3o](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes10161/16_1/smartgrid/#introdu%C3%A7%C3%A3o)> Acesso em: 10 de Outubro de 2018.



PEREIRA, A. L., **Modelo de otimização multiobjetivo para reconfiguração de redes elétricas inteligentes**. Universidade Federal do Espírito Santo Mestrado em Energia. 2018.

SIEBERT, L. C. **Sistema de otimização de resposta à demanda para redes elétricas inteligentes**. 151f. Curitiba, 2013.

SIMÕES, A. **Gerenciamento pelo Lado da Demanda via Fluxo Ótimo de Potência**. Disponível em <<http://www.labspot.ufsc.br/~simoies/pesquisa/pq-dsm.html>>. Acesso em: 28 de novembro de 2018.

SLACK, N. CHAMBERS, S., JOHNSTON, R.; **Administração da Produção**. São Paulo:Atlas, 1997.

SUCUPIRA, I. R. **Métodos Heurísticos Genéricos: Metaheurísticas e Hiper-Heurísticas**. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

TORRES, J. V.N. **Diagnóstico Energético em uma Unidade de Separação de Gases**. 2010. 57 p. Monografia – Universidade do Pernambuco, Recife, 2010.

VERGILIO, A. H. B. **Alocação ótima de capacitores em redes de distribuição de energia elétrica trifásicas e desbalanceadas**. 2016. 92 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas,2016.

VILCHEZ LAZO, R. E. **Heurística especializada aplicada na alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radial**. 2015. 108 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2015.

Yao, L., CHANG, W. C. and YEN, R. L. **An iterative deepening genetic algorithm for scheduling of direct load control, Power Systems**. IEEE Transactions on, 20(3), pp. 1414-1421, 2005.

ZHANG, Qi, MORARI M. F., IGNACIO, B., GROSSMANN, E., SUNDARAMOORTHY, A., PINTO, C. J. M. **An adjustable robust optimization approach to scheduling of continuous industrial processes providing interruptible load**. Computers and Chemical Engineering. Elsevier EUA. P.106–11,2016.

ZHONG, H. XIA, Q., XIA, Y., KANG, C., XIE, L., WEN, H., ZHANG, H. **Integrated dispatch of generation and load: A pathway towards smart grids**, **Electric Power Systems**. Res. (2014) Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2014.04.005>. Acesso em: 03 de maio de 2018.



```

A = [A; -AA ; AA];
b = [b; -bmin; bmax];

X0 = Ps;
tic
options = optimset('Algorithm','interior-point')
[X,Fval,Flag,Out,Lamb]=fmincon(@Custo,X0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,[],options);

nT = 24;
for t=1:nT
    for s=1:6
        tt=(s-1)*nT+t;
        if t==1
            V(s,t)=V0m(s)+X(tt)-Ps(tt);
        else
            V(s,t)=V(s,t-1)+X(tt)-Ps(tt);
        end
    end
end
Vmin = reshape(Vmin,24,6)';

function [y,Custo_hora,CkwHora]=Custo(X)

nT = 24;
DC = 401;
cdp=43.85
cdfp=13.95
cudp=87.70;
cudfp=27.90;
tp=0.53425;
tfp=0.35666;

Ckw = X.*1.15;
Ch = zeros(6,24); for t=1:nT
    for s=1:6
        tt=(s-1)*nT+t;
        if t<=18
            Ch(s,t)=Ckw(tt)*tfp;
        elseif t<=22
            Ch(s,t)=Ckw(tt)*tp;
        else
            Ch(s,t)=Ckw(tt)*tfp;
        end
    end
end
end
Ckw_aux = reshape(Ckw,24,6)';
CkwHora = sum(Ckw_aux(:, :));
for t=1:nT
    if CkwHora(t)<=400
        if t<=18
            Chd(t)=400*cdfp;
        elseif t<=22
            Chd(t)=400*cdp;
        else
            Chd(t)=400*cdfp;
        end
    else
        if t<=18
            Chd(t)=400*cdfp + (CkwHora(t))*cudfp;
        elseif t<=22
            Chd(t)=400*cdp + (CkwHora(t))*cudfp;
        end
    end
end

```

```

        else
            Chd(t)=400*cdfp + (CkwHora(t))*cudfp;
        end
    end
end

Custo_hora = sum(Ch) + sum(Chd);
y = sum(Custo_hora);

figure()
for s = 1:6
    subplot(2,3,s)
    plot(V(s,:))
    hold on
    plot([1 nT],[Vmin(s) Vmin(s)],'r--')
    title('Silo '+string(s))
    xlabel('tempo (h)')
    ylabel('Massa (ton)')
end

Pe = reshape(X,24,6)';
figure()
for s = 1:6
    subplot(2,3,s)
    plot(Pe(s,:))
    title('Silo '+string(s))
    xlabel('tempo (h)')
    ylabel('Vazão de entrada (ton/h)')
end
figure()
plot(sum(Pe(:,:)))
hold on
plot([1 nT],[350 350],'r--')
title('Total das entradas do Silo ')
xlabel('tempo (h)')
ylabel('Vazão TOTAL de entrada (ton/h)')
[Custo_Total, Custo_hora, Ckwhora] = Custo(X);

figure()
plot(Custo_hora)
title('Custo dos Silos por hora')
xlabel('tempo (h)')
ylabel('Custo (reais/h)')

figure()
plot(Ckwhora)
title('Consumo dos Silos por hora')
hold on
plot([1 nT],[400 400],'r--')
xlabel('tempo (h)')
ylabel('Consumo (kwh)')

```