



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica

JORGE HENRIQUE MOREIRA SANTANA

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA OTIMIZAÇÃO
DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL**

Uberlândia
2018

JORGE HENRIQUE MOREIRA SANTANA

**APLICAÇÃO DE ALGORITMOS EVOLUTIVOS PARA OTIMIZAÇÃO
DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL**

Trabalho apresentado como requisito parcial
de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de
Curso do Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Carlos Eduardo Tavares

Assinatura do Orientador

Uberlândia
2018

Dedico primeiramente este trabalho a Deus, que me deu forças e possibilitou a conclusão do grande desafio que foi o curso de Engenharia Elétrica. Dedico também aos meus pais, Ailton Eustáquio Santana e Telma Cristina Rodrigues Moreira Santana, pela dedicação e pelo amor com que me educaram.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Ailton Eustáquio Santana, à minha mãe Telma Cristina Rodrigues Moreira Santana e ao meu irmão Guilherme Eustáquio Moreira Santana pela paciência e compreensão durante o curso.

Ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares pela oportunidade, incentivo, motivação e orientação deste trabalho.

Aos gerentes Nilson Barbosa e Jackson Guzzo, ao supervisor Antônio Carlos Oliveira bem como à BRF pela oportunidade, incentivo, motivação e orientação no desenvolvimento deste trabalho, bem como a abertura para testes do software.

Aos operadores de refrigeração Francisco Chagas e Rafael Oliveira pelo treinamento do sistema de refrigeração e do processo industrial.

E, finalmente, à instituição Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Elétrica por toda a infraestrutura oferecida.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo de *software* para controle de sistemas de refrigeração industrial utilizando algoritmos evolutivos.

Um controle de qualquer sistema pode ser classificado em três categorias: preventivo, simultâneo e posteriores. A BRF – Fábrica de Margarinas forneceu a oportunidade da confecção deste trabalho. Tenta-se uma forma de controle de temperatura preventiva: com o plano de produção e os parâmetros dos compressores de amônia em mãos, o problema foi modelado para a utilização em um algoritmo evolutivo. Com isso, é possível não somente obter a melhor combinação possível de compressores para aquele dia de produção como também estipular o consumo elétrico daqueles compressores, prever a demanda elétrica e verificar a quantidade de fluido refrigerante que está sendo perdido no processo.

Palavras-chave: Refrigeração, algoritmos evolutivos, refrigeração, inteligência artificial, controle preventivo, eficiência energética, eficiência térmica.

ABSTRACT

This work describes the development of a prototype software for control of industrial refrigeration systems using evolutive algorithms.

A control of any system can be classified into three categories: preventive, simultaneous and subsequent. The BRF - Margarine Factory offered an opportunity to make this work. A form of preventive temperature control is attempted: with the production plan and the payment of ammonia tablets on hand, the problem for modeling for use in a evolutive algorithm. Thus, it is not only the best possible for compressors for the production of carbon dioxide but also the electric consumption of those compressors, to predict an electric demand and to verify the amount of refrigerant that is being lost in the process.

Keywords: Refrigeration, evolutionary algorithms, refrigeration, artificial intelligence, preventive control, energy efficiency, thermal efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Número de indústrias alimentícias de 1920.	12
Figura 2: Evolução do número de indústrias alimentícias, 1920-1994.	13
Figura 3: Linha do tempo da formação da estrutura de suporte brasileira à indústria alimentícia.	14
Figura 4: Taxa de crescimento do número de estabelecimentos.	14
Figura 5: Margarina Qualy.	16
Figura 6: O problema do caixeiro viajante.	21
Figura 7: Modelagem do problema de otimização na produção de frio das cristalizadores de margarina.	21
Figura 8: Cromossomo binário.	23
Figura 9: Cromossomo alfabético.	24
Figura 10: Cromossomo real.	24
Figura 11: Cromossomo misto.	24
Figura 12: Exemplo de cruzamento genético.	25
Figura 13: Mutação genética.	26
Figura 14: Ciclo de Refrigeração. Fonte: Portal Ambiente Gelado.	31
Figura 15: Esquema simplificado do sistema.	32
Figura 16: Exemplo de cromossomo.	33
Figura 17: Melhor cromossomo encontrado pelo algoritmo.	37
Figura 18: Gráfico Carregamento Mecânico (PU) x Rendimento MIT.	38
Figura 19: Gráfico Carregamento Mecânico (P.U) x Fator de Potência.	39
Figura 20: Cromossomo de qualidade 2.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de placa dos compressores de amônia.	33
Tabela 2: Dado caloríficos das margarinas.	34
Tabela 3: Vazão das linhas de produção.	35
Tabela 4: Entrada de dados: Plano de produção.	37
Tabela 5: Informações da solução apresentada.	40
Tabela 6: Informações da solução de qualidade 2.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FIESP: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

DEPECON: Departamento de Economia, Ciência e Tecnologia

ITAL: Instituto de Tecnologia de Alimento

ABIA: Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação

sbCTA: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos

FTA: Faculdade de Tecnologia de Alimentos

RAIS: Relatório Anual de Informações Sociais

MTE: Ministério de Trabalho e Emprego

PPHO: Procedimento Padrão de Higiene Operacional

POPs: Procedimento Operacional Padronizado

BRF: *Brazil Foods*

MITs: Motores de Indução Trifásicos

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

RLC: Resistivo-Indutivo-Capacitivo

PU: Por Unidade

MAC: *Macintosh*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 A INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA NO BRASIL	12
1.2 A INDÚSTRIA PRODUTORA DE MARGARINAS	15
1.3 BRF E QUALY	17
2 JUSTIFICATIVA.....	18
3 OBJETIVOS.....	19
4 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	20
4.1 FERRAMENTA COMPUTACIONAL	20
4.2 OTIMIZAÇÃO.....	20
4.3 ALGORITMOS COMPUTACIONAIS	21
4.3.1 O PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE.....	21
4.3.2 ALGORITMOS DE FORÇA BRUTA.....	22
4.3.3 ALGORITMO DE DIJKSTRA E BELLMAN-FORD.....	22
4.3.4 ALGORITMO GENÉTICO.....	23
4.5 CALORIMETRIA	27
4.5.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	27
4.5.2 ESTADOS DA MATÉRIA	28
4.5.3 CALOR SENSÍVEL.....	29
4.5.4 CALOR LATENTE.....	29
4.6 REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL	30
4.6.1 COMPONENTES DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO	30
4.6.2 CICLO DA AMÔNIA	31
5 DESENVOLVIMENTO	32
5.1 MODELAGEM DO PROBLEMA.....	32
5.2 ALGORITMO GENÉTICO.....	33

5.2.1 CROMOSSOMO	33
5.2.2 DADOS DE PLACA DOS COMPRESSORES	33
5.2.3 DADOS DAS MARGARINAS	34
5.2.4 POTÊNCIA TÉRMICA NECESSÁRIA	35
5.2.5 FUNÇÃO <i>FITNESS</i>	35
5.3 ALGORITMO DE FORÇA BRUTA	36
6 RESULTADOS.....	37
6.1 VALIDAÇÃO.....	37
6.1.1 POTÊNCIA TÉRMICA EXCEDENTE.....	37
6.1.2 CARREGAMENTO E RENDIMENTO	38
6.1.3 CONSUMO.....	39
6.1.4 FATOR DE POTÊNCIA	39
6.1.5 RESULTADOS	40
6.2 DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	40
6.3 ESTIMATIVAS.....	41
7 CONCLUSÕES	42
8 REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

1.1 A indústria alimentícia no Brasil

O ano de 1808 ficou marcado como um momento divisor de águas no Brasil: As tropas do imperador Napoleão Bonaparte invadiram Portugal, forçando a retirada da corte portuguesa ao Brasil. Com isso, as leis restringiam o desenvolvimento da produção industrial com exceção de alguns produtos que atendiam ao consumo interno foram revogadas. Essa lei foi responsável pelo grande atraso nos métodos de produção das indústrias brasileiras em plena revolução industrial. As restrições foram cessadas, todavia o crescimento foi extremamente lento até o final do século XIX. Se intensificou no início do século XX, com 3258 empresas identificadas no senso industrial de 1907 [1].

O censo industrial de 1920, apresentado na Figura 1, mostra que as empresas do ramo alimentício representavam um percentual de 20,31% das empresas brasileiras, sendo que destas as indústrias de cereais, chá e café lideravam com 60,2% [1].

Censo Industrial de 1920	No Estabelec.	
Cereais, chá e café	1632	60,2%
Moagem de cereais	478	
Beneficiamento de arroz	303	
Torrefação e moagem de café	455	
Beneficiamento de café	353	
Beneficiamento de mate	43	
Laticínios	322	11,9%
Manteiga e queijos	303	
Congelamento de leite	16	
Fabricação de leite condensado	3	
Derivados de trigo	229	8,5%
Massas alimentícias	188	
Biscoitos	41	
Óleos e gorduras	150	5,5%
Banha	126	
Óleos vegetais	24	
Chocolate e doces	126	4,7%
Doces	115	
Chocolate	11	
Carnes pescados e derivados	99	3,7%
Conservas de peixe e de carne	91	
Congelamento de carne	8	
Açúcares	88	3,2%
Refinação de açúcar	88	
Diversos	63	2,3%
Vinagre, massa de tomates etc.	63	
Total de estabelecimentos	2709	100,0%

Figura 1: Número de indústrias alimentícias de 1920.

Fonte: Portal Alimentos Processados.

Esse impulso da indústria alimentícia ocorreu devido a vários fatores, dentre eles o crescimento da economia, o apoio do governo ao desenvolvimento industrial e substituição de importações, a redução do fluxo de importações durante a segunda guerra mundial, o crescimento populacional acelerado, o crescimento da renda per capita, atração do capital estrangeiro, dentre outros [1].

A evolução do número de indústrias alimentícias entre 1920 e 1994 é apresentada na Figura 2. Pode-se perceber que entre 1920 e 1950, pode-se observar um aumento de 91,75% no número de estabelecimentos da indústria alimentícias. Entre as décadas de 50 e 60 houve uma estabilidade, voltando a crescer entre as décadas de 60 e 70. Nos anos seguintes, houve uma grande oscilação no número de empresas, até que em 1995 houve uma mudança na metodologia de contabilização do número de estabelecimentos alimentícios. Conforme os dados da FIESP/DEPECON de 2016 existem 45.393 indústrias processamento de produtos alimentícios no Brasil [1].

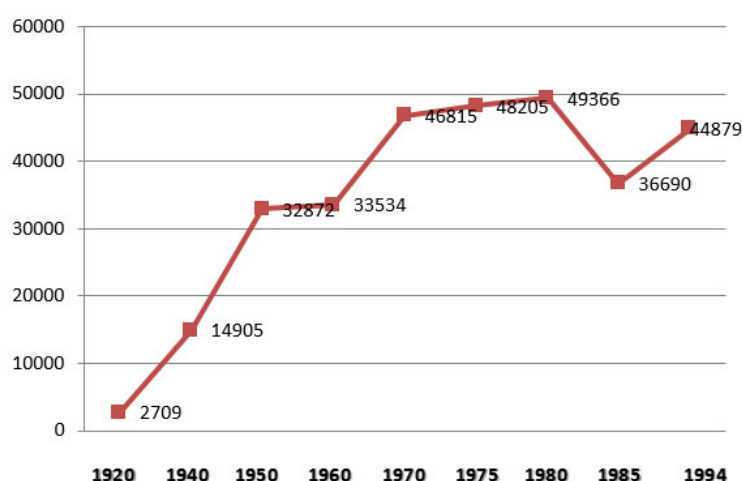


Figura 2: Evolução do número de indústrias alimentícias, 1920-1994.

Fonte: Portal Alimentos Processados.

Tendo em vista o grande crescimento da indústria alimentícia, houve a necessidade de uma estrutura de suporte em diversas áreas, tais como a regulamentação da atividade industrial, regulamentação de qualidade e etc. Foi criado então o ITAL (Instituto de Tecnologia de Alimento), a ABIA (Associação Brasileira das Indústrias de Alimentação), a sbCTA (Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos) e a FTA (Faculdade de Tecnologia de Alimentos) [1]. A Figura 3 mostra a linha do tempo da formação da estrutura de suporte brasileira à indústria alimentícia.

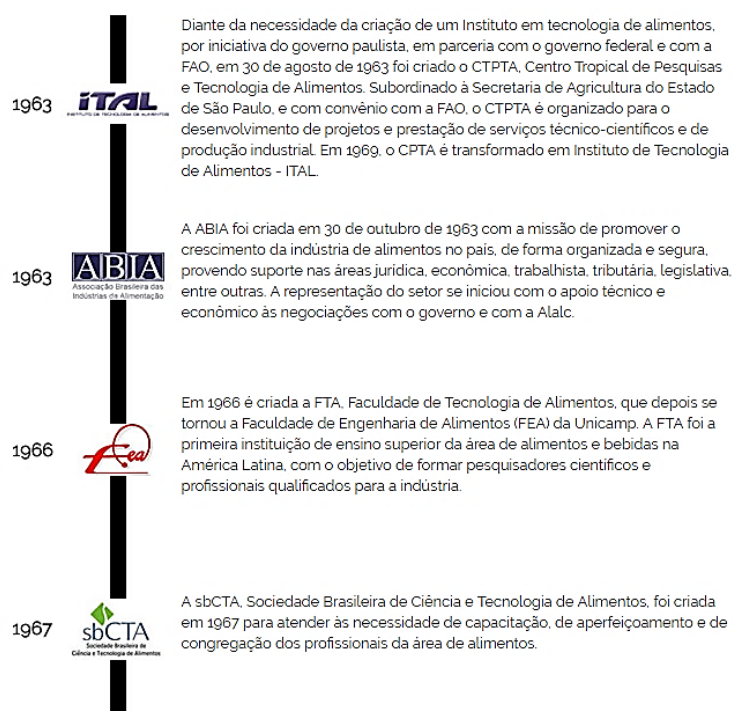


Figura 3: Linha do tempo da formação da estrutura de suporte brasileira à indústria alimentícia.

Fonte: Portal Alimentos Processados.

A demanda por alimentos no mundo vem crescendo cada vez mais com a incorporação de novas variáveis ao mercado consumidor, dentre elas, os contingentes populacionais. Segundo os dados do Relatório Anual de Informações Sociais (RAIS/MTE), Figura 4, os estabelecimentos formais que possuam como principal atividade a produção no setor de alimentos representam 19% do total de estabelecimentos no Brasil em 2011[2].

No Rio de Janeiro, por exemplo, 14% dos estabelecimentos formais são do ramo alimentício. Com isso, esse setor consegue ocupar 13% da mão de obra formal do Brasil, além de ser responsável por 9% da massa salarial brasileira [2].

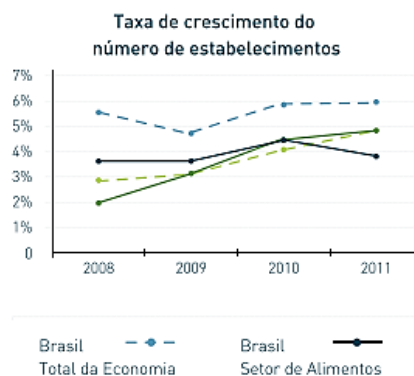


Figura 4: Taxa de crescimento do número de estabelecimentos.

Fonte: CAGED/MTE

1.2 A indústria produtora de margarinas

No ano de 1860, na França, o imperador Napoleão III precisava encontrar um substituto à manteiga que pudesse ter um sabor similar e que fosse mais barata para alimentar os pobres e, principalmente, o exército. Para isso, ofereceu uma recompensa a quem encontrasse tal solução. Neste sentido, o químico Hippolyte Mège-Mouriés inventou uma substância chamada oleomargarina. Ao misturar gordura de vaca com butirina e água e deixando-a solidificar, a substância ficava muito similar com a manteiga. Posteriormente, em 1871, na Holanda, surgiu a primeira fábrica de margarinas do mundo [3].

Graças a revolução industrial, a humanidade foi a um patamar jamais atingido. Com os produtos deixando de ser manufaturados e se tornando maquinofaturados, a produção passou a ser feita sob larga escala. Com isso, foi possível a existência de mais produtos no mercado, gerando assim a concorrência e possibilitando que a população pudesse ter mais possibilidades de escolha, sem o monopólio. A qualidade de vida das pessoas envolvidas nesse novo sistema que, mais adiante, seria chamado de capitalismo, aumentou consideravelmente: Indústrias de consumo primário (farmacêuticas e alimentícias, por exemplo) começaram a surgir, suprimindo as necessidades básicas de todos aqueles que estivessem envolvidos no sistema [4].

Devido às melhorias no processo de produção da margarina ao passar dos anos, hoje tem-se um processo muito bem estruturado. Existem várias etapas no processo de fabricação de margarinas, que são, resumidamente:

- **Neutralização:** Ao receber o óleo vegetal, deve-se eliminar a acidez separando dele os ácidos graxos;
- **Branqueamento:** Os resíduos da etapa anterior são retirados por meio da filtração, ficando assim com uma coloração branco-transparente;
- **Desodorização:** Nesta etapa retira-se qualquer forma de odor e sabor do óleo;
- **Hidrogenação:** Nem toda margarina passa por esta etapa do processo. Nela, é adicionado hidrogênio ao óleo para aumentar a durabilidade do alimento;
- Dosagem de Ingredientes:
 - **Dosagem de Lipossolúveis:** São adicionados no óleo os insumos lipossolúveis (vitaminas, corantes e estabilizantes/emulsificantes, este para melhorar a mistura dos ingredientes);
 - **Dosagem de Hidrossolúveis:** Após a conclusão da etapa anterior, o óleo é chamado de fase aquosa da margarina. Nesta etapa, é inserido o leite desnatado pasteurizado, sal e outros ingredientes hidrossolúveis;

- **Cristalização:** Aqui, a fase aquosa é resfriada gradativamente enquanto é batida, dando origem ao creme, que é o produto final;
- **Encaixotamento:** A margarina é embalada em potes, ficando como mostra a Figura 5. Logo depois encaixotada e enviada ao centro logístico de distribuição;



Figura 5: Margarina Qualy.

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

Atualmente, existe uma grande demanda no mercado de margarinas não somente no cenário brasileiro, mas também no cenário mundial. Já existem até aspectos da cultura brasileira que giram em torno do tal produto, como por exemplo em pratos culinários.

Em uma fábrica de margarinas atual existem várias áreas que darão suporte para a produção de margarina. Dentre elas, temos como principais:

- **Produção:** Área central da indústria. É responsável por transformar a matéria prima em produto, utilizando para isso todos os recursos necessários das outras áreas.
- **Manutenção:** Responsável pela garantia do funcionamento de todos os equipamentos contidos na indústria. Caso algum equipamento crítico para o processo da área de produção não funcione corretamente, a equipe de manutenção é convocada imediatamente para a resolução do problema, visando minimizar o máximo possível os impactos negativos.
- **Limpeza:** Conhecido na BRF como Procedimento Padrão de Higiene Operacional (PPHO), essa área é responsável por garantir a limpeza para a produção. Por ser uma indústria de alimentos, é imprescindível a adequação do processo industrial aos protocolos de Procedimentos Operacionais Padronizados (POPs) regido pela Anvisa.
- **Garantia da Qualidade:** Área responsável por não só garantir a qualidade do produto na saída da produção, mas também durante todo o processo de produção. A equipe da qualidade decide se os produtos produzidos pela produção estão aptos para irem ao mercado para o consumo.

- **Administrativo:** Essa área faz todos os trâmites que envolvam documentações e protocolos, como por exemplo compras, vendas, gestão de recursos, planos de produção, dentre outros.
- **Utilidades:** Área responsável por fornecer recursos que auxiliarão na produção, como sistema de energia elétrica, rede de abastecimento e tratamento de água, sistema de refrigeração, sistema de ar comprimido, circuito de vapor, dentre outros.

1.3 BRF e Qualy

A segunda guerra mundial trouxe grandes consequências para o mundo, incluindo o Brasil. Graças a ela, era impossível a importação de produtos. Paralelamente, estava havendo um grande avanço industrial: se antes a região de Santa Catarina era vista como área desprovida de desenvolvimento socioeconômico, entre os anos de 1935 e 1945 o estado começa a se tornar um importante centro produtor, executando atividades como criação de suínos e cultivo de trigo, milho, feijão e fumo. O município de Concórdia, por exemplo, esteve entre os 10 mais prósperos do estado [5]. Nesse cenário surgia as duas maiores empresas alimentícias do Brasil.

Fundada por Attilio Fontana em junho de 1944, a Sadia foi a maior empresa alimentícia do Brasil. Foi criada a partir da aquisição de um frigorífico e um moinho em Concórdia - Santa Catarina, onde foi reformado e batizado como Sadia, combinação das iniciais de "Sociedade Anônima" com as letras finais da cidade em questão [5].

Fundada por Saul Brandalise em 1934, a Perdigão surgiu de um pequeno armazém de secos e molhados na cidade de Videira, em Santa Catarina. Iniciou as atividades iniciais com um abatedouro de suínos em 1939. Até 2009, sua principal concorrente era a Sadia [6].

A Sadia investia substancialmente na baixa do dólar e, com a crise de 2008, o dólar desvalorizou e isso a levou à um enorme prejuízo. Por conta disso, ela foi vendida para a sua concorrente Perdigão em maio de 2009[7], formando assim o grupo que atualmente é denominado BRF, encerrando assim como a maior exportadora brasileira de proteínas e a maior produtora do setor de carnes [5].

Atualmente a BRF é a maior detentora de marcas alimentícias do Brasil, tendo mais de 30 marcas em seu portfólio, dentre elas a Sadia, Perdigão, Qualy, Paty, Rezende, Dánica e Bocatti. Seus produtos são comercializados em mais de 150 países, possui mais de 100 mil funcionários e possuem mais de 50 fábricas em 8 países: Argentina, Brasil, Emirados Árabes Unidos, Holanda, Malásia, Reino Unido, Tailândia e Turquia [7].

2 JUSTIFICATIVA

Devido à crise instalada no Brasil desde 2015, a BRF estava passando por problemas financeiros e, por isso, o uso da energia de forma mais eficiente se tornou primordial para a empresa. Neste contexto, identificou-se que o processo de cristalização, onde a margarina aquosa torna-se um creme, é uma das etapas de produção que mais consome energia elétrica. Nesta etapa são utilizados sete compressores de amônia de modo que nenhum possui inversor de frequência devido aos cortes financeiros internos e tão pouco sistemas automatizados (denominados Sistema Auto-Stage). Além disso não possuía também funcionários qualificados para a instalação desses sistemas, caso fossem comprados. Vislumbrando uma solução de fácil implementação e baixo custo este trabalho de TCC é focado em um projeto de melhoria do sistema de refrigeração de margarinas.

A metodologia utilizada é baseada no crescente desenvolvimento da tecnologia na área da computação, mais particularmente a de aplicação de algoritmos evolutivos computacionais, ou seja, o algoritmo genético. Este tipo de algoritmo é muito utilizado para otimizar processos de áreas diversas. Para a sua implementação, basta apenas o conhecimento em programação e a capacidade do programador de modelar o problema na forma exigida por este algoritmo, apresentando-se assim como uma boa alternativa para a otimização do uso dos compressores do sistema de refrigeração e consequente melhoria na eficiência energética do processo.

3 OBJETIVOS

A partir do que foi exposto, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma ferramenta que auxilie o operador da sala de máquinas a escolher qual a melhor combinação de compressores para um determinado dia de produção.

- Objetivos específicos:
 - Coletar os principais ingredientes de cada margarina para efetuar os cálculos de calor específico e calor de fusão;
 - Coletar o valor da temperatura de entrada e de saída do cristalizador de cada margarina;
 - Coletar os dados de placa dos compressores de amônia;
 - Coletar os dados de placa dos motores dos compressores de amônia;
 - Modelar o problema e criar um programa computacional em Excel capaz de escolher os melhores compressores com base no plano de produção do dia;

4 MÉTODOS E TÉCNICAS

4.1 Ferramenta Computacional

O software utilizado para a execução dos trabalhos é o Microsoft Office Excel, um editor de planilhas que é produzido pela empresa Microsoft [8].

A grande vantagem do Excel é o fato de que nele é possível criar planilhas dinâmicas e automatizadas graças às funções, oriunda das linguagens de programação de alto nível, só que de forma extremamente facilitada.

4.2 Otimização

Empresas querem produzir o máximo possível gastando o mínimo de recursos possíveis: É essa a ideia central da otimização. A indústria vem cada vez mais buscando não apenas atingir seus objetivos, mas também de forma sustentável, ou seja, vêm buscando cada vez mais a eficácia aliada à eficiência [9].

Existem muitas vantagens na otimização de processos industriais, dentre eles a economia de recursos de qualquer natureza (dinheiro, materiais, pessoas, tempo e etc.). Além disso, tem-se a preservação ambiental, a qual a indústria tenta utilizar menos recursos naturais nos seus processos [10].

Basicamente, um problema de otimização é de simples resolução, bastando apenas conhecimentos de cálculos diferenciais. Geralmente, o problema é dividido em três etapas bastante intuitivas [11]:

- **Modelagem:** Anota-se todas as variáveis do problema, relacionando suas leis físicas [11];
- **Obtenção da Função:** Obtém-se uma função física relacionando todas variáveis [11];
- **Calculo Diferencial:** Obtém-se por meio do cálculo diferencial os pontos críticos da função obtida anteriormente. Com isso, tem-se as melhores e as piores soluções para seu problema [11];

Apesar da ideia ser simples existem muitas dificuldades, dentre eles a própria modelagem do problema, a obtenção da função matemática que rege o processo (função objetivo) ou até mesmo a dificuldade de encontrar o maior máximo ou mínimo global em uma função com grande quantidade de variáveis. Com isso, percebe-se que uma desvantagem da otimização é o aumento da complexidade quando acrescentadas mais variáveis na modelagem do problema, demandando assim mais tempo para a modelagem da solução e para a obtenção dos possíveis resultados.

4.3 Algoritmos Computacionais

Com cálculos extremamente massivos, rápidos e precisos, a dificuldade de encontrar máximos e mínimos globais foi diminuída com o avanço computacional. Teoricamente, bastava-se achar a função que rege o problema e aplicar algoritmos computacionais para então achar a melhor solução para tal problema. Todavia, os computadores possuem limitações e, dependendo de como é modelado o problema, levam-se anos para achar a melhor solução possível [10]. Para melhor ilustrar a aplicação desta ferramenta, na sequência são apresentados alguns exemplos de técnicas e algoritmos computacionais na solução de problemas de otimização de processos.

4.3.1 O Problema do Caixeiro Viajante

O problema do caixeiro viajante é um problema clássico de grafo exponencial. Nele, um caixeiro mora em uma metrópole com várias cidades satélites ao redor. O problema consiste no caixeiro passar por todas as cidades sem repetições usando o menor caminho possível. Nesse caso, as variáveis do problema são as cidades e as distâncias entre si [10]. Passando isso para um grafo, tem-se na Figura 6:

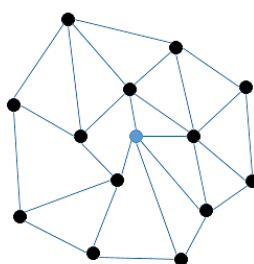


Figura 6: O problema do caixeiro viajante.

Na Figura 6, tem-se que a bolinha de cor mais clara é a cidade central onde o caixeiro está. As bolinhas escuras são as cidades (chamados de vértices do grafo) e as linhas são as estradas por onde o caixeiro passará.

Pode-se notar com a Figura 7 que o problema enunciado em questão é basicamente o problema do caixeiro viajante com algumas modificações:

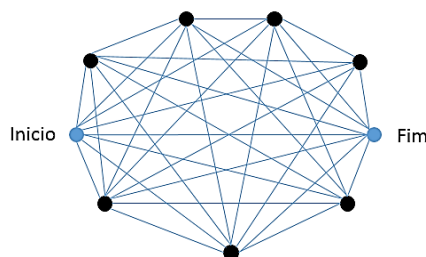


Figura 7: Modelagem do problema de otimização na produção de frio das cristalizadores de margarina.

4.3.2 Algoritmos de Força Bruta

Conhecidos também como algoritmos exatos, são algoritmos que, basicamente, procuram a melhor solução por toda a função. Um exemplo em uma linguagem de programação procedural estruturada é um código onde basicamente existem vetores sendo percorridos dentro de laços.

A vantagem deste método é o fato de encontrar a melhor solução absoluta para o problema. Mas, dependendo da modelagem ou da complexidade do problema, paga-se um preço muito caro: O tempo necessário para conseguir tal resposta torna-se extremamente grande, tornando-o impraticável [10].

Esse método não é eficiente em problemas de grafos com grandes quantidades de vértices. Usando este algoritmo no problema do caixeiro viajante em um computador que consiga processar 1.000 caminhos por segundo, levaria cerca de 10 segundos para achar a melhor solução caso o grafo seja de 10 vértices, 50 dias para um de 15 vértices, 2 anos para um de 16 vértices e 19.300 anos para um de 20 vértices. Com isso pode-se notar que o problema do caixeiro viajante é um problema de complexidade exponencial, conforme falado anteriormente [10].

Foi exatamente por isso que este foi por muito tempo um dos mais famosos problemas matemáticos até então sem solução. Com isso, foi-se desenvolvendo algoritmos mais eficientes com os anos [10].

4.3.3 Algoritmo de Dijkstra e Bellman-Ford

Concebido em 1956 e publicado em 1959 pelo cientista da computação Edsger Dijkstra [12], esse algoritmo é utilizado atualmente em redes de computadores e de transportes. Basicamente, escolhe-se um dos vértices como o início e o outro como o fim. Partindo disso, calcula-se os caminhos referente aos vértices que unem indiretamente o início ao fim, e dá-se um passo de acordo com o menor caminho. No passo subsequente, o algoritmo busca novamente os vértices que ligam o ponto em questão ao fim, e toma-se novamente a decisão de se dar um passo no vértice de menor caminho. Isso se repete até que chegar no vértice final [10].

Uma desvantagem é que o algoritmo é limitado apenas a arestas com pesos positivos, ou seja, “distâncias” positivas [10].

Bellman-Ford fez um algoritmo que resolve os problemas que o de Dijkstra resolve com a adição da possibilidade de as arestas possuírem pesos negativos. Todavia, esse método é mais lento que o de Dijkstra [13].

4.3.4 Algoritmo Genético

O surgimento dos algoritmos genéticos se deu por volta de 1950, quando vários biólogos usavam técnicas computacionais para simular e estudar sistemas biológicos. Por volta da década de 1970, John Holland iniciou os estudos sobre a aplicação dos algoritmos genéticos, na Universidade de Michigan. Mais tarde, em 1989, David Goldberg apresentou a utilização de algoritmos genéticos para a resolução de problemas de engenharia e de otimização, tornando-o muito popular no meio científico [10].

Os algoritmos genéticos são, basicamente, um eficiente sistema de busca de pontos críticos de funções, resolvendo problemas de diferentes domínios, como a automação industrial, ecologia, pesquisa operacional, dentre outros. Podem também serem utilizados em aprendizado de máquinas e problemas em pesquisa numérica, ou seja, problemas combinatórios. Mesmo não garantindo a melhor solução do problema, o grande destaque desta técnica está no fato de ser uma solução simples e de ter desempenhos computacionais surpreendentes. Outra grande vantagem é que eles podem ser utilizados em problemas com complexidade exponencial [14] [15].

Basicamente, o algoritmo é a codificação da teoria darwiniana da evolução: baseado no princípio da seleção natural e reprodução genética, é empregado um processo adaptativo em busca dos genes mais bem adaptados. A grande ideia é a modelagem do problema como um meio natural, e as possíveis soluções são os genes [10].

Todos os algoritmos genéticos seguem os seguintes princípios:

- 1) **Encontrar alguma função *fitness*:** É uma função que envolva as variáveis do problema que será otimizado. Essa função deverá ser capaz de julgar se os cromossomos (escolha) são bons ou ruins.
- 2) **Representar as soluções do problema em termos de cromossomos:** Existem várias formas de se codificar um cromossomo, dentre eles [10]:
 - a) **Cromossomo binário:** É usado em problemas onde as variáveis binárias, ou seja, do tipo “Ligado/Desligado”, “Com/Sem”, “Aberto/Fechado”, dentre outros [10]. Temos como exemplo a Figura 8.

Máquina 1	Máquina 2	Ventilador	Valvula 1BNC	Valvula 2BNC
Ligada	Desligada	Ligado	Fechada	Aberta

Figura 8: Cromossomo binário.

- b) **Cromossomo alfabético:** É usando em problemas onde as variáveis são discretas, e cada opção é representada por uma letra como mostra a Figura 9 [10].

t1	t2	t3	t4	t5
<i>Maquina A</i>	<i>Maquina D</i>	<i>Maquina C</i>	<i>Maquina A</i>	<i>Maquina F</i>

Figura 9: Cromossomo alfabético.

- c) **Cromossomo real:** Como podemos ver na Figura 10, esse cromossomo é usado em problemas onde as variáveis são contínuas, colocando assim o número real em cada célula do vetor cromossomo [10].

Valor Ventilador	Frequencia Inversor	Valor Válvula	PI	PD
<i>80%</i>	<i>45 Hz</i>	<i>0,5</i>	<i>35,45</i>	<i>23,74</i>

Figura 10: Cromossomo real.

- d) **Cromossomo misto:** É usado em problemas onde temos variáveis binárias, discretas e contínuas no mesmo problema, conforme mostra a Figura 11.

t1	t2	Valor Válvula	Máquina 1	Máquina 2	Frequência Inversor
<i>Máquina F</i>	<i>Maquina A</i>	<i>43%</i>	<i>Ligada</i>	<i>Desligada</i>	<i>28 Hz</i>

Figura 11: Cromossomo misto.

- 3) **Criar a população genética inicial:** O algoritmo genético começa a trabalhar a partir de uma população inicial, que são conjuntos de soluções do problema, sendo essas boas ou ruins [16]. Com relação a esse item, deve-se determinar duas características:
 - a) **O tamanho da população:** O tamanho deve ser determinado com base nas outras taxas do algoritmo, como por exemplo na taxa de cruzamento, na taxa de mutação, dentre outras [17].
 - b) **A forma de gerar a população:** Existem duas maneiras de gerar a população:
 - b.1) Pode-se gerar uma população de forma aleatória quando não se tem ideia do suposto “formato” de uma solução ótima [18];
 - b.2) Caso exista alguma experiência ou sentimento de como seria o “formato” de uma solução ótima, pode-se usar da heurística, que consiste em indicar um grupo de cromossomos onde a solução ideal possa estar próxima. A vantagem deste método é que, muito possivelmente, o algoritmo encontrará a solução ótima de forma mais rápida [18].
- 4) **Operações genéticas:** Essa população é submetida à função saúde para a avaliação dos cromossomos mais bem adaptados. Esses cromossomos então irão sofrer operações genéticas:
 - a) **Cruzamento ou crossing over:** É a obtenção de cromossomos filhos a partir do cruzamento dos cromossomos dos pais, visando encontrar indivíduos

geneticamente superior aos seus descendentes [16]. O procedimento é simples e a Figura 12 ilustra o procedimento: Dos selecionados para o cruzamento, pega-se dois cromossomos. São atribuídos a esses cromossomos duas constantes probabilísticas de cruzamento. É gerado então para cada um par de número aleatório entre 0 e 1. Então, as constantes são comparadas com os números gerados aleatoriamente e, se forem menores, os cromossomos são submetidos ao cruzamento, que é basicamente a criação de novos indivíduos oriundos da mistura dos seus genes [10]. Com isso, a probabilidade do filho vier mais bem adaptada é alta [14]. Logo depois o processo se repete até que atinja alguma das condições de parada.

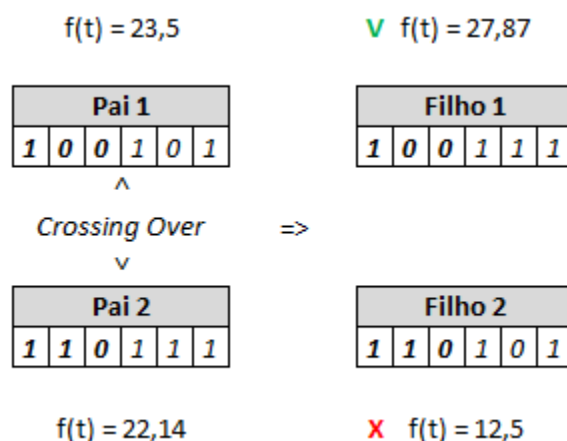


Figura 12: Exemplo de cruzamento genético.

- b) **Mutação:** Antes da chegada do Pedro Alvares Cabral em 1500 existiam comunidades indígenas no Brasil. Essas comunidades eram extremamente bem adaptadas ao país em questão: suportavam o clima, o ambiente selvagem, as doenças locais, dentre outros. Mas com a chegada dos europeus, essas comunidades indígenas começaram a enfrentar doenças europeias com as quais nunca tiveram contato. Isso fez com que uma grande parte da população indígena fosse à óbito, visto que os mesmos não possuíam a resistência de um europeu [19] [20]. Isso aconteceu pelo fato de que os indígenas eram uma comunidade isolada, o que fez eles serem mais bem adaptados para o local onde viviam, mas não para o restante do planeta. Isso acontece nos algoritmos genéticos, e deve-se evitar que ocorra algo semelhante aos indígenas: a solução caminhar para um ponto crítico local ao invés de um global [10]. A mutação então veio com a proposta de inserir e manter a diversidade na população [15]. O processo de mutação é basicamente

escolher aleatoriamente um indivíduo e alterar um de seus genes conforme mostra a Figura 13. Deve-se tomar cautela com a mutação, pois ela pode transformar um indivíduo bom em um ruim [15].

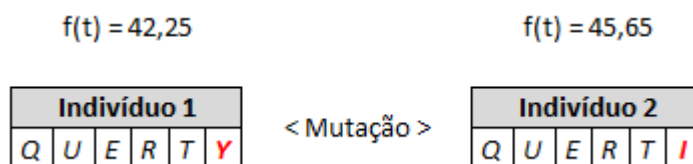


Figura 13: Mutação genética.

- 5) **Crítérios de seleção dos genes mais bem adaptados:** Existem diferentes critérios de seleção e, dependendo do problema a ser tratado, existem critérios melhores ou piores. Dentre eles, temos:
- **Seleção aleatória:** Aleatoriamente, pega-se um determinado número de indivíduos e aplica-lhes a função *fitness*. Com isso, pega-se os N indivíduos mais fracos e descarta-os. O número de indivíduos escolhidos, bem como o número de indivíduos que serão descartados, são calculados de acordo com a quantidade total de indivíduos, garantindo que mesmo que haja seleção, ainda exista a diversidade dos menos adaptados [16].
 - **Torneio:** Separa-se a população em grupos. Desses grupos, descarta-se os N indivíduos menos adaptados. Esse método também garante a diversidade dos menos adaptados devido à pluralidade dos grupos [16].
 - **Ranking:** Aleatoriamente, posiciona-se os indivíduos em uma "fila". Então, os últimos N indivíduos são eliminados. Esse método pode, por muitas vezes, eliminar indivíduos mais bem adaptados, fazendo com que o algoritmo demore para convergir a um máximo global [16].
 - **Truncamento:** Elimina-se os N piores indivíduos menos adaptados. Esse método não garante a diversidade por eliminar os menos adaptados, sendo muitas vezes necessário o uso de mutação com a finalidade de evitar a convergência em máximos locais [16].
- 6) **Crítérios de parada:** Muitas vezes, o algoritmo não consegue localizar o máximo esperado da modelagem do problema. Isso significa que o algoritmo achou uma solução ótima ao invés da melhor ou que não exista uma solução que atenda as

expectativas do modelador. Quando isso acontece, é importante definir um critério de parada, para que o algoritmo não fique rodando infinitamente. Temos, por exemplo:

- **Critério do *fitness* mínimo:** Quando um membro da população atinge um *fitness* mínimo, o algoritmo para e fornece esse membro como solução do seu problema [17].
- **Critério do *fitness* médio mínimo:** Quando o *fitness* médio dos membros de uma população atinge um determinado valor, o algoritmo para e fornece o membro com o *fitness* mais alto dessa população como solução do problema [17].
- **Critério da estabilização:** Durante um determinado número de transição populacional, caso o *fitness* não se altere significativamente, o algoritmo para e fornece o membro com o *fitness* mais alto dessa população como solução do problema [17].

Tendo em vista a natureza do problema em questão, na sequência são apresentados alguns conceitos sobre transferência de calor

4.5 Calorimetria

Na termodinâmica existe um ramo que estuda as trocas de energia na forma de calor entre corpos: a calorimetria. Calor então é a transferência de energia térmica de um sistema para outro [18].

Tomando como exemplo dois corpos que possuem temperaturas diferentes. Ao serem colocados em contato térmico, a natureza tentará entrar em equilíbrio, criando um vetor gradiente na direção do corpo mais frio para o corpo mais quente. Contrário a esse gradiente surgirá um fluxo de calor, ou seja, o corpo mais quente começará a se esfriar e o mais frio começará a esquentar, até que ambos possuam a mesma temperatura [19] [20].

4.5.1 Transferência de calor

A transferência de calor pode ocorrer de três formas: radiação, condução e convecção [21]:

- **Radiação:** Também conhecida como irradiação, essa é a forma de transferência de energia térmica proveniente das ondas eletromagnéticas. Não é necessário que haja um meio para que ocorra a transferência, como podemos ver na transferência de calor entre o Sol e a Terra.

- **Condução:** É uma transferência que ocorre com a agitação das moléculas. Ao colocar uma barra de ferro em contato com o fogo, por exemplo, suas moléculas ficam agitadas e começam a chocar com outras moléculas da barra. Essa colisão transfere a energia mecânica de uma molécula para outra, que colide com uma terceira, e assim por diante. Com isso, toda a temperatura é transmitida na barra. Metais são excelentes condutores de calor por terem facilidade de transferir essa energia mecânica quase que de forma elástica.
- **Convecção:** É a transferência que ocorre, principalmente, em gases e líquidos. Ao esquentar água em uma panela, a parte que está próxima ao fogo começa a aquecer. Esse aquecimento faz com que o líquido nessa área fique menos denso que o líquido frio, e então a parte quente troca de lugar com a fria por densidade. Então, a parte fria é aquecida até ficar com densidade menor que a outra, e há a troca de posição novamente. Esse ciclo se repete até que o fluido atinja o equilíbrio térmico com a chama. É por isso que, quando colocamos água para ferver, verificamos que a mesma fica agitada.

4.5.2 Estados da matéria

Para a física clássica, a matéria é encontrada em três estados físicos na natureza: sólido, líquido e gasoso. Fisicamente, o que determina o estado da matéria é o quão próximo estão as partículas que a constitui [22].

- **Sólido:** É o estado em que um elemento se encontra quando as moléculas que o constitui estão extremamente próximas. Esse estado faz com que a matéria possui uma forma bem definida, volume constante e as forças moleculares predominantes são as de coesão (ou atração).
- **Líquido:** Aqui, as moléculas estão mais afastadas que no estado sólido, mas seu volume ainda é constante. Existem mais forças de repulsão e a forma que a matéria se assume nesse estado depende do recipiente no qual elas estão situadas, além da facilidade de escoamento.
- **Gasoso:** O movimento molecular nesse estado é o maior entre os anteriores. Pelo fato das forças moleculares predominantes serem de repulsão, não existe uma forma nem volume definido, apesar de tomarem as formas dos recipientes no qual estão situadas assim como no estado líquido. A característica marcante desse estado é a capacidade de compressão que a matéria tem quando está nesse estado.

4.5.3 Calor sensível

Quando um corpo recebe energia térmica, sua temperatura muda. Quando não há mudança no estado físico da matéria que está tendo sua temperatura alterada, essa energia térmica é chamada de calor sensível [23]. Para calcular essa energia, temos a seguinte equação [23]:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_f - T_i) \text{ [cal]}$$

Onde:

- **Q:** É o calor sensível, em [cal];
- **c:** É o calor específico do material, em $\left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}\right]$;
- **m:** É a quantidade de massa, em [g];
- **T_i:** É a temperatura inicial da matéria, em [°C];
- **T_f:** É a temperatura final da matéria, em [°C];

Cada material possui seu calor específico, sendo este obtido experimentalmente. Ela indica a quantidade mínima de calor necessário para que um material altere sua temperatura [23].

4.5.4 Calor latente

Conforme falado anteriormente, a temperatura de um corpo muda quando um corpo recebe energia térmica. Quando há mudança no estado físico da matéria que está tendo sua temperatura alterada, essa energia térmica é chamada de calor latente ou calor de transformação [24]. Para calcular essa energia, temos a seguinte equação [24]:

$$Q = m \cdot L \text{ [cal]}$$

Onde:

- **Q:** É o calor latente, em [cal];
- **L:** É o calor latente do material, em $\left[\frac{\text{cal}}{\text{g}}\right]$;
- **m:** É a quantidade de massa, em [g];

Cada material possui seu calor latente, sendo este obtido experimentalmente. Ela indica a quantidade mínima de calor necessário para que um material mude seu estado físico [24].

4.6 Refrigeração Industrial

A manipulação térmica foi um dos maiores avanços da humanidade. Em estudos históricos, percebe-se a constante tentativa do ser humano de manipular calor: Em impérios antigos soberanos os grandes reis mandavam seus escravos trazer grandes pilhas de gelo para refrescarem as bebidas durante o verão. Com a invenção dos microscópios no século XVIII, descobriu-se a existência de micro-organismos e que eles são os responsáveis pela decomposição dos alimentos. Mais tarde, conseguiram provar que é possível retardar a decomposição dos alimentos se este alimento for resfriado [25].

Com o passar dos tempos, todas as áreas da sociedade utilizam de máquinas térmicas: Freezers, aparelhos de ar-condicionado, geladeiras, compressores, e etc. Temos a refrigeração comercial, residencial e industrial.

4.6.1 Componentes do Sistema de Refrigeração por Compressão

Focando na refrigeração industrial da BRF, temos compressores de amônia para a refrigeração no processo de confecção de margarinas.

No ciclo de refrigeração da BRF existem alguns componentes básicos, que são:

- **Fluido Refrigerante:** É o produto químico utilizado no processo de transporte de calor em sistemas de refrigeração. Na fábrica da Qualy de Uberlândia, utilizam a amônia devido à sua grande capacidade de troca térmica e ao seu baixo preço [26].
- **Compressor:** É responsável por aspirar e comprimir o vapor resultante da troca térmica no evaporador. Esse vapor chega ao compressor em baixa pressão/temperatura e sai em alta pressão/temperatura [26].
- **Condensador:** É um trocador de calor instalado em ambientes externos. Ele condensa o gás superaquecido proveniente do compressor, fazendo-o retornar ao estado de líquido saturado [26].
- **Válvula de Expansão:** É uma válvula que permite a expansão do líquido saturado devido a um diferencial de pressão (queda de pressão) no refrigerante, resultando em uma mistura de líquido e vapor sub-resfriado [26].
- **Evaporador:** É um trocador de calor instalado no interior da câmara. Ele recebe o fluido refrigerante, amônia, na forma líquida (sub-resfriada), realizando troca térmica entre as paredes dos tubos do equipamento com a margarina. O resultado dessa transferência de calor faz com que o refrigerante evapore [26].

- **Sub-Cooling:** Sendo opcional e instalado apenas para aumentar a eficiência energética, o *sub-cooling* é um trocador de calor que faz com que o vapor liberado pelo evaporador libere sua energia térmica na água, que está a temperatura ambiente.
- **Trocador de Calor:** É onde o fluido refrigerante irá fazer a troca térmica com a margarina. O trocador de calor é um equipamento que permite essa troca sem que os mesmos se misturem [27].
- **Reservatório:** É onde o fluido refrigerante fica estocado.

4.6.2 Ciclo da Amônia

Denominado pelos técnicos de refrigeração como ciclo da amônia, o processo de refrigeração se dá pelo seguinte protocolo:

- O líquido saturado sai do reservatório em alta pressão e a temperatura ambiente, passando então pelo *sub-cooling*. Com isso, a temperatura tem uma queda média de 15%, indo direto para a válvula de expansão [26];
- Na válvula de expansão, o líquido sofre uma queda brusca de pressão e temperatura, indo para temperaturas inferiores a 0°C [26];
- No evaporador, o fluido sub-resfriado recebe o calor proveniente da margarina, fazendo a amônia evaporar [26];
- O vapor gerado no interior do evaporador é aspirado pelo compressor e, logo em seguida, é comprimido a alta pressão e temperatura [26];
- Por último, o vapor superaquecido segue para o condensador, sendo liberado para o meio externo todo o calor recebido durante o processo de compressão, fazendo com que o fluido refrigerante volte ao estado de líquido saturado, fechando assim o circuito [26], conforme ilustrado na Figura 14.

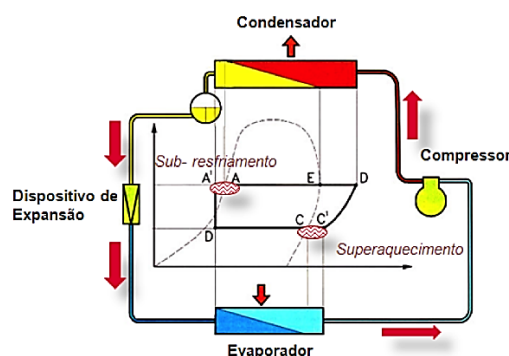


Figura 14: Ciclo de Refrigeração. Fonte: Portal Ambiente Gelado.

5 DESENVOLVIMENTO

Na fábrica de margarinas da BRF – Unidade Margarinas, existem sete compressores de amônia, de diferentes potências, todos interligados num único circuito de refrigeração. Antes da margarina ser cristalizada, ela passa por um processo de resfriamento sem mudança de estado. Então, a mesma vai para um trocador de calor, que está em contato com o sistema de refrigeração: de um lado do trocador, tem-se a amônia fria e, do outro, a margarina quente. Tendo em vista que os compressores podem operar simultaneamente, ou não, de acordo com o volume da produção, o objetivo deste trabalho é criar um *software* capaz de mostrar ao operador de refrigeração qual a melhor combinação de compressores para um dado plano de produção no dia.

A plataforma escolhida para a confecção do programa foi o Excel pelo simples fato de que na BRF existe toda uma extensa burocracia na instalação de softwares de terceiros. Caso o software fosse confeccionado em alguma outra IDE, como por exemplo, *CodeBlocks*, *C#* ou até mesmo o *Visual Basic*, a burocracia para a instalação dos mesmos seria imensa, visto que além do aplicativo, seria necessária a instalação de programas auxiliares, como por exemplo o *NET Framework*, *Direct-X*, isso sem contar o próprio compilador juntamente com a *IDE*. Fora isso, seria necessária uma autenticação toda vez que o programa fosse compilado, já que o sistema *Windows* na empresa roda na rede interna da indústria. Apesar de ser mais complicado esboçar o algoritmo para que o mesmo rode no *Excel*, essa era basicamente a única forma rápida e sem custos para se utilizar um *software* externo na empresa.

5.1 Modelagem do problema

O diagrama de blocos simplificado do sistema é visualizado na Figura 15. O projeto consiste de um programa que orientará o operador de frio da sala de máquinas a escolher o melhor compressor de amônia possível para um determinado plano de produção, visando a economia de energia e, ao mesmo tempo, que a carga térmica seja suprida.



Figura 15: Esquema simplificado do sistema.

Para resolver o problema, foi criado um algoritmo misto: a modelagem do problema para a aplicação do algoritmo é oriunda do algoritmo genético, mas o método para encontrar os máximos globais é, basicamente, um algoritmo de força bruta.

5.2 Algoritmo genético

Conforme falado anteriormente, a modelagem do problema foi feita conforme o algoritmo genético. Com isso, foram definidos um cromossomo e uma função *fitness*.

5.2.1 Cromossomo

Foram utilizados cromossomos binários de 7 posições, onde cada posição representa um compressor. O número "1" representa o estado "ligado" do determinado compressor, e o número "0" indica o estado "desligado".

Tem-se como exemplo o seguinte indivíduo, mostrado na Figura 16:

Cromossomo 1							
Fitness	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
279,23	0	0	0	0	0	1	1

Figura 16: Exemplo de cromossomo.

Esse cromossomo representa que apenas o compressor 1 e 2 estão ligados, estando os demais desligados. Ao lado, tem-se o valor absoluto de quão boa aquela solução é, que será explicado a seguir.

5.2.2 Dados de placa dos compressores

Como parte dos dados de entrada, foi-se necessário ir ao campo para obter os dados de placa dos compressores. Os valores necessários eram, basicamente, a potência elétrica necessária para o funcionamento e a potência térmica fornecida por esse compressor. Com isso, tem-se dois dados importantes para a modelagem, que é o consumo de cada compressor e a capacidade térmica de cada um.

A Tabela 1 apresenta os principais dados dos compressores:

Tabela 1: Dados de placa dos compressores de amônia.

Dados dos Compressores			
Comp.	Potência (kCal/h)	Potência (CV)	Consumo (kWh)
1	-215	150	110,25
2	-380	190	139,65
3	-370	125	91,88
4	-225	175	128,63
5	-250	180	132,30
6	-270	200	147,00
7	-230	170	124,95

5.2.3 Dados das margarinas

Uma variável necessária para o algoritmo é a potência térmica necessária para cada margarina. Primeiro, é necessária a obtenção das temperaturas de entrada e saída de cada margarina e sua receita para a obtenção a energia térmica necessária para a execução desse processo.

Tem-se que:

$$Q_{total} = m_{total} \cdot \left((T_f - T_i) \cdot \sum_{i=0}^n p_i \cdot c_i + \sum_{i=0}^n p_i \cdot L_i \right) [Cal]$$

Onde p_i é o valor percentual de cada ingrediente da mistura. Como não há mudança de estado nas margarinas, a segunda parcela da equação é nula.

$$Q_{total} = m_{total} \cdot (T_f - T_i) \cdot \sum_{i=0}^n p_i \cdot c_i [Cal]$$

Como a margarina é feita, basicamente, de óleo vegetal e água, tem-se:

$$Q_{total} = m_{total} \cdot (T_f - T_i) \cdot (p_{agua} \cdot c_{agua} + p_{oleo} \cdot c_{oleo}) [kCal]$$

Como o calor específico da água é $1,0 \frac{cal}{g \cdot ^\circ C}$ e o do óleo é $0,5 \frac{cal}{g \cdot ^\circ C}$, temos:

$$Q_{total} = m_{total} \cdot (T_f - T_i) \cdot \left(p_{agua} + \frac{p_{oleo}}{2} \right) [kCal]$$

Onde:

- **Q_{total}**: É o calor necessário para mudar a temperatura da margarina, em [kCal];
- **P_{agua}**: É o valor percentual de água na mistura;
- **P_{oleo}**: É o valor percentual de óleo na mistura;
- **m**: É a quantidade de massa, em [kg];
- **T_i**: É a temperatura inicial da matéria, em [°C];
- **T_f**: É a temperatura final da matéria, em [°C];

Para ilustrar melhor o problema, supõe-se algumas misturas com suas energias térmicas necessárias para suas mudanças de temperatura calculadas com a Tabela 3:

Tabela 2: Dado caloríficos das margarinas.

Margarinas								
Nome	Código	Porcentagem		Cp	Ls	Ts (°C)	Ti (°C)	Tf (°C)
		Óleo	Água					
Margarina A	A	60,00%	40,00%	0,70	-37,32	38	35	10
Margarina B	B	70,00%	30,00%	0,65	-30,21	33	42	11
Margarina C	C	30,00%	70,00%	0,85	-58,66	32	35	15
Margarina D	D	40,00%	60,00%	0,80	-51,55	32	38	20
Margarina E	E	20,00%	80,00%	0,90	-65,77	32	40	5
Margarina F	F	50,00%	50,00%	0,75	-44,44	32	50	20

Onde T_s é a temperatura intermediária da margarina, que será desconsiderada por não influenciar no funcionamento do algoritmo.

5.2.4 Potência térmica necessária

Na fábrica de margarinas existem 5 linhas de produção, e cada uma possui uma vazão de produção diferente. Tomando como exemplo a Tabela 3, tem-se:

Tabela 3: Vazão das linhas de produção.

<i>Linhas</i>		
Linha	Código	Vazão (kg/h)
<i>Linha 01</i>	<i>L1</i>	<i>4700</i>
<i>Linha 02</i>	<i>L2</i>	<i>3800</i>
<i>Linha 03</i>	<i>L3</i>	<i>7000</i>
<i>Linha 04</i>	<i>L4</i>	<i>3000</i>
<i>Linha 05</i>	<i>L5</i>	<i>5000</i>

Com isso, pode-se calcular o tempo necessário para uma linha conseguir processar uma quantidade de margarina:

$$t = \frac{Vazão_{linha}}{massa_{plano}} [h]$$

A potência térmica necessária para processar uma certa quantidade de margarina em uma linha é dada por:

$$P_{Termica_{necessária}} = \frac{Q_{total}}{t} \left[\frac{kCal}{h} \right]$$

Com isso, tem-se dados suficientes para deduzir uma função *fitness*.

5.2.5 Função *fitness*

Para encontrar a função *fitness*, deve-se deduzir uma função matemática que seja inversamente proporcional ao consumo elétrico e ao desperdício de energia térmica.

Vários testes foram feitos juntamente com os técnicos de refrigeração, garantindo que a função encontrada corresponda a dados condizentes com a realidade. Com isso, a melhor equação encontrada foi:

$$Fitness = \frac{K}{\sum_{i=0}^n P_{el} i. (P_{Termica_{fornecida} i} - P_{Termica_{necessária} i})}$$

Onde:

- **K**: É uma constante. Ela é apenas para uma melhor visualização do valor da fitness, que tende a ser um valor muito pequeno. Experimentalmente, o valor ideal encontrado foi 10^6 .
- **P_{eli}**: É a potência elétrica do compressor i, em [w];
- **P_{TermicaFornecida}i**: É a potência térmica fornecida pelo compressor i, em $\left[\frac{kCal}{h}\right]$;
- **P_{TermicaNecessária}i**: É a potência térmica necessária para o processo, em $\left[\frac{kCal}{h}\right]$;

5.3 Algoritmo de força bruta

Existem 7 compressores de amônia nesse sistema. Para calcular o número de possibilidades diferentes que temos para cada cromossomo, tem-se:

$$Possibilidades = (Quantidade_{estados})^n$$

Onde:

- **Quantidade_{estados}**: Como cada cromossomo possui apenas dois estados (desligado e ligado), esse número vale 2.
- **n**: Quantidade de células que esses cromossomos possuem, que no caso é 7.

Com isso, vê-se que existem 128 formas diferentes desses compressores serem ligados. Um algoritmo genético não é indicado para esse problema por ter poucas quantidades de possíveis possibilidades, sendo mais fácil a aplicação do cálculo de força bruta para tal.

Com essa decisão, foi feito um algoritmo para calcular a *fitness* em todas as possibilidades. Além da facilidade citada anteriormente, isso faz com que a resposta encontrada seja a melhor solução possível, diferente do algoritmo genético que, muitas vezes, encontra apenas uma solução ótima. Uma outra vantagem para esse caso é que o algoritmo fica extremamente simples e leve.

6 RESULTADOS

Prosseguindo com os exemplos citados anteriormente, pela Tabela 4, supondo que em um dia a fábrica de margarinas irá produzir 300 toneladas de margarina A na linha 1, 250 toneladas de margarina C na linha 4 e 100 toneladas de margarina F na linha 5:

Tabela 4: Entrada de dados: Plano de produção.

Plano de Produção		
Linha	Margarina	Quantidade (kg)
L1	A	300.000
L2		
L3		
L4	C	250.000
L5	F	100.000
Total (kg)		650.000

Com isso, o algoritmo achará a melhor combinação de compressores para o plano de produção digitado proposto, apresentado na Figura 17.

Melhor Cromossomo							
Fitness	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
315,16	0	1	1	0	1	0	0

Figura 17: Melhor cromossomo encontrado pelo algoritmo.

6.1 Validação

Para comprovar a eficácia do algoritmo, o *software* calcula alguns dados com a finalidade de comparar com outras soluções, conforme descrito a seguir.

6.1.1 Potência térmica excedente

O cálculo da potência térmica excedente é feito com a subtração da potência térmica fornecida pela potência térmica necessária. A potência térmica excedente é importante para suprir as perdas do circuito térmico. Na BRF existem sensores de temperatura na entrada e na saída das cristalizadoras para que essas temperaturas possam ser monitoradas. Caso a margarina não atinja a temperatura desejada na saída, um possível motivo é que a potência térmica excedente não consegue suprir essas perdas. Para resolver isso, é necessário que o operador escolha uma solução menos eficiente, aumentando assim a potência térmica excedente e suprimindo as perdas térmicas.

Com isso, sabe-se do quanto de energia térmica está sendo desperdiçada. Isso possibilita que a equipe de manutenção pode tirar indicadores ao fazer manutenção no sistema de refrigeração, visando aumentar a eficiência energética do sistema.

6.1.2 Carregamento e Rendimento

O carregamento mecânico (ou potência mecânica por unidade) é calculado efetuando a divisão da potência térmica fornecida pela potência térmica necessária. Com isso, pode-se definir o carregamento utilizando os gráficos cedidos pelo fabricante, neste caso a WEG.

Infelizmente, a WEG não fornece as equações dos gráficos fornecidos nos catálogos dos motores para uma análise mais profunda. Então, foi feita uma análise de ponto a ponto do gráfico Potência Mecânica x Rendimento e, com o *software* Excel, foi feita uma regressão polinomial. Experimentalmente nota-se, pela análise da Figura 18, que um polinômio de grau 4 consegue aproximar suficientemente uma curva do gráfico real.

A equação encontrada foi:

$$n = -6,76.Pmec_{PU}^4 + 16,66.Pmec_{PU}^3 - 114,56.Pmec_{PU}^2 + 5,45.Pmec_{PU} + 0,0254$$

Onde:

- **n**: É o rendimento do sistema elétrico.
- **Pmec_{PU}**: É a potência mecânica (térmica), em PU.

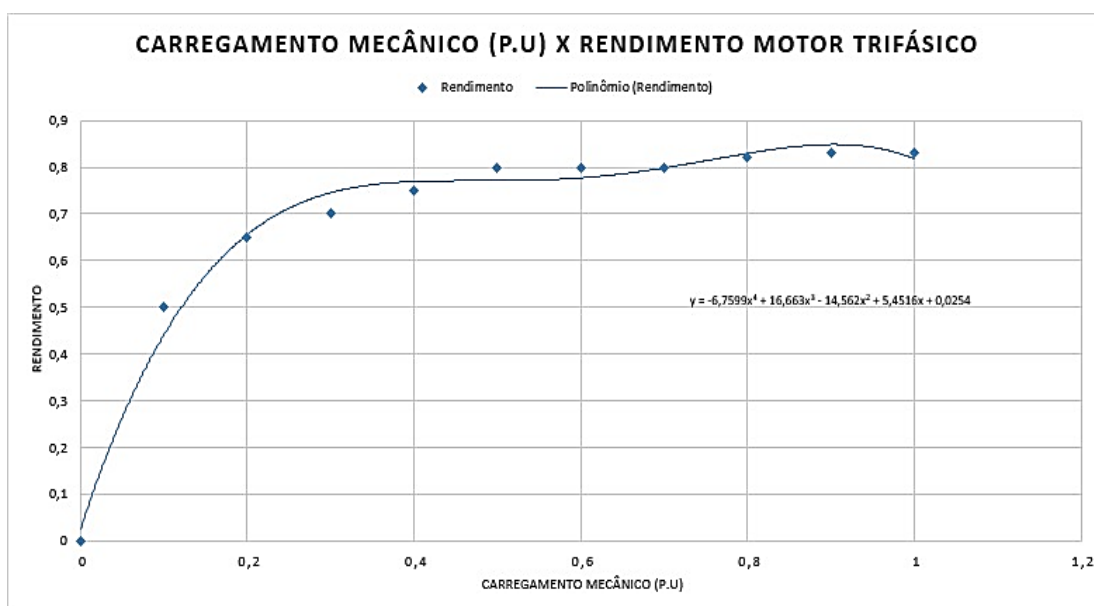


Figura 18: Gráfico Carregamento Mecânico (PU) x Rendimento MIT.

Fonte: www.ecatalog.weg.net

6.1.3 Consumo

Com a potência elétrica da máquina, o tempo de funcionamento das linhas e o rendimento da máquina, é possível achar o consumo elétrico utilizando a seguinte equação:

$$Consumo = \frac{t \cdot \sum_{i=0}^n P_{mec} i}{n}$$

6.1.4 Fator de Potência

Pode-se definir o fator de potência utilizando os gráficos cedidos pela WEG. Assim como acontece com o rendimento, a WEG não fornece as equações dos gráficos de fator de potência fornecidos nos catálogos dos motores para uma análise mais profunda. Então foi feita uma regressão polinomial para achar um gráfico próximo ao cedido pela WEG conforme mostra a Figura 19.

A equação encontrada foi:

$$fp = \cos\phi = 0,261 \cdot \ln(P_{mec_{PU}}) + 0,829$$

Onde:

- **fp**: É o fator de potência do sistema elétrico.
- **cos ϕ** : É o fator de potência do sistema elétrico.
- **P_{mecPU}**: É a potência mecânica (térmica), em PU.

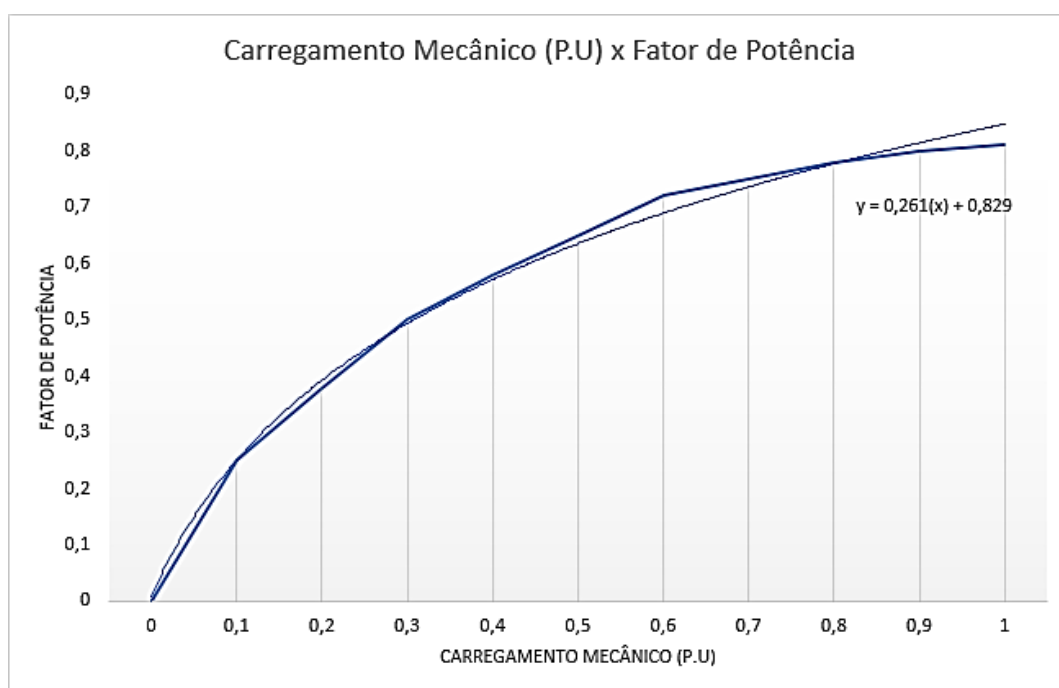


Figura 19: Gráfico Carregamento Mecânico (P.U) x Fator de Potência.

Fonte: www.ecatalog.weg.net

6.1.5 Resultados

Conforme mostrado na Tabela 5, o software retorna para o usuário uma tabela contendo as informações teóricas do cromossomo sugerido pelo algoritmo.

Tabela 5: Informações da solução apresentada.

Informações	
Potencia Necessária (kCal/h)	-881,45
Potencia Fornecida (kCal/h)	-890,00
ΔP (kCal/h)	-8,55
Carregamento	99,04%
Rendimento	0,81
Fator de Potência	0,83
Consumo (kWh)	8.736,03

Caso as perdas não sejam supridas, o usuário poderá alterar o campo "Qualidade". Quanto maior o número digitado nesse campo, pior será a solução. Esse número representa o grau de maioridade do fitness que o algoritmo vai escolher. Por exemplo, caso o número seja 1, o algoritmo irá mostrar a solução de maior fitness e, caso seja 2, o algoritmo mostrará a segunda maior solução, e etc.

6.2 Discussão de resultados

Com os cromossomos gerados pelo software, é possível fazer algumas análises:

- A probabilidade de o funcionário escolher uma solução aleatoriamente que não atenda a capacidade térmica exigida pelo processo é de 44,53% no exemplo citado;
- A probabilidade de o funcionário escolher a melhor solução aleatoriamente para esse processo é de 0,78%;
- A probabilidade de o funcionário escolher uma solução aleatoriamente que, para o algoritmo, é 60% pior que a melhor solução apontada pelo algoritmo é de 1,56%;
- A probabilidade de o funcionário escolher uma solução aleatoriamente que, para o algoritmo, seja 90% pior que a melhor solução encontrada pelo algoritmo é de 3,9%;
- A probabilidade de o funcionário escolher uma solução aleatoriamente que, para o algoritmo, seja 99% pior que a melhor solução encontrada pelo algoritmo é de 40,62%;

Pode-se notar que o algoritmo é muito eficiente se comparado com um funcionário que escolha os compressores de modo aleatório.

Ao escolher a segunda melhor solução, tem-se o cromossomo representado pela Figura 20:

Melhor Cromossomo							
Fitness	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
128,68	0	1	1	0	0	1	0

Figura 20: Cromossomo de qualidade 2.

Com isso, tem-se seguintes dados da Tabela 6:

Tabela 6: Informações da solução de qualidade 2.

Informações	
Potencia Necessária (kCal/h)	-881,45
Potencia Fornecida (kCal/h)	-900,00
ΔP (kCal/h)	-18,55
Carregamento	97,94%
Rendimento	0,82
Fator de Potência	0,82
Consumo (kWh)	9.827,85

Comparando com os valores obtidos com a melhor solução, tem-se que:

- O consumo subiu 11,10%;
- O fator de potência foi de 0,83 para 0,82;
- O rendimento foi de 0,81 para 0,82;
- O desperdício de potência térmica aumentou em 53,9%;

Com exceção do rendimento, todos os dados pioraram com a solução menos eficiente. Devido ao erro da aproximação polinomial da curva de rendimento, ele subiu quando deveria cair.

6.3 Estimativas

Foram realizados alguns testes na fábrica para comprovar o funcionamento do software. O primeiro teste foi para verificar se o cálculo teórico de consumo do algoritmo corresponde com a realidade. Em 4 dias de testes, teve-se um erro de 5% para mais ou para menos.

O segundo teste foi para verificar se a solução apontada pelo algoritmo era possível. Nos 2 primeiros dias, caso o funcionário escolhesse a solução apontada pelo algoritmo, o consumo diário teria uma redução média de 3% do total. Supondo que o consumo mensal médio da fábrica de margarinas gira em torno de R\$ 1.000.000,00, a empresa uma economia de R\$30.000,00 mensais ou R\$ 360.000,00 anuais caso seguissem a solução apontada pela planilha.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma proposta de aplicação de algoritmos evolutivos para otimizar a utilização de compressores para o processo de refrigeração de margarinas em uma indústria alimentícia.

Apesar dos resultados otimistas, infelizmente os testes de verificação da eficácia da metodologia foram realizados em apenas uma semana, e a quantidade de dados obtidos não foi suficiente para definir o grau de confiabilidade do estágio em que o algoritmo se encontra. Fica como sugestão para trabalhos futuros a inclusão de mais variáveis externas, como temperatura ambiente e umidade relativa do ar, além de melhoramentos no próprio algoritmo, deixando-o mais abrangente possível.

Não obstante, percebe-se que a metodologia utilizada apresenta grande potencial para otimização dos processos de refrigeração, de forma a melhorar a utilização da energia elétrica. Além disso, estima-se que aliando o algoritmo proposto com melhores técnicas de controle, monitoramento e automação industrial, pode-se chegar a resultados ainda mais sofisticados.

8 REFERÊNCIAS

[1] – Portal Alimentos Processados – Acessado 16/11/2017 16:55

Link: <http://www.alimentosprocessados.com.br/industria-evolucao-industria-de-alimentos-e-bebidas-no-brasil.php>

[2] – SEBRAE – Acessado 19/04/2018 15:14

Link:

https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/RJ/Menu%20Institucional/Sebrae_SET_d ez12_alim.pdf

[3] - Carmichael, E B (Apr 1973). "Michel Eugene Chevreul. Experimental chemist and physicist: lipids and dyes". *The Alabama journal of medical sciences*. Pág. 223 a 232.

[4] - Cavalcantee, Zequias Vieira. Da Silva, Mauro Luis Siqueira. A importância da revolução industrial no mundo da tecnologia. 25 de Outubro de 2011.

[5] – Sadia - 50 anos construindo uma história (publicação institucional), São Paulo, Prêmio, 1994.

[6] – Revista Superinteressante, O Mistério das Marcas, edição 261, janeiro de 2009, p. 34.

[7] – Portal Folha.

Link: <https://www1.folha.uol.com.br/fsp/dinheiro/fi1905200902.htm>.

Acessado 16 de junho de 2018, as 01:29.

[8] – Portal DSS Resources: A Brief History of Spreadsheets – Acessado 12/11/2017 18:42

Link: <http://www.dssresources.com/history/sshistory.html>

[9] – Portal ERP: CIOs Buscam Reduzir Custos – Acessado 13/11/2017 09:17

Link: <https://portalerp.com/noticias/2280-cios-buscam-otimizar-custos>

[10] – RODRIGUES, GardêncioPuiatti.Otimização de Rotas Através da Aplicação de Algoritmos Exatos e Heurísticos. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Presidente Antônio Carlos, Barbacena. 2004. Acessado 09/07/2017 19:32

Link: <http://www.unipac.br/site/bb/tcc/tcc-7634bdb2be0ed3ab1505fb318c3d3b72.pdf>

[11] – Portal UFRJ: Problemas de Otimização – Acessado 14/11/2017 18:56

Link:

<http://www.im.ufrj.br/dmm/projeto/projetoc/precalculo/sala/conteudo/capitulos/cap101s4.html>

[12] – BOAVENTURA, PAULO OSWALDO. Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos. São Paulo, ed. Edgard Blucher, 1996. Pág. 225 à 273.

[13] – ThomasH. Cormen, Charles Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein (2007). Algorithmen – Eine Einführung 2. ed. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. Pág. 585 à 586.

[14] –REBELLO e HUMACHRE, 2000– REBELLO, F.R.; HUMACHER, S. Uma proposta de algoritmo de duas fases para roteamento de veículos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 32, 2000, Viçosa: UFV, 2000;

[15] –GARCIA, 2000– GARCIA, A.L.; GARCIA, B.; FRIEDMANN. Resolução de um problema de equilíbrio de trabalho e distribuição de agentes de serviço. In. SIMPÓSIO38BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 32, 2000, Viçosa, Anais. Viçosa: UFV,2000. Pág. 923 à 935.

[16] –GOLDBARG, 2000 - GOLDBARG, M.C.; GOUVÊA, E.F. Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos. Rio de Janeiro, ed. Campos, 2000. Pág. 649.

[17] –ROMERO e GALLEG0, 2000 – ROMERO, R; GALLEG0, R. A. Algoritmo genético especializado para problemas de alocação ótima de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISAOPERACIONAL, 32, 2000, Viçosa: UFV, 2000;

[18] - Kleber Cavalcante. Calorimetria I. R7. Brasil Escola. Consultado em 24 de junho de 2018 as 21:05.

[19] - Arbex Sarkis, Nicolau ([2013]). Calorimetria. Editora Poliedro. p. 264.

[20] - Luiz Sampaio, José (2005). Calorimetria. São Paulo: Atual Editora. p. 174.

[21] – Portal Mundo Educação.

Link: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/radiacao-conducao-conveccao.htm>.

Consultado em 24 de junho de 2018 as 21:08.

[22] – Portal Mundo Educação.

Link: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/estados-fisicos-materia.htm>.

Consultado em 24 de junho de 2018 as 21:14.

[23] – Portal Mundo Educação.

Link: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/calor-sensivel.htm>

Consultado em 24 de junho de 2018 as 21:59.

[24] - Halliday, David (2011). Fundamentos de Física, 8ª ed, vol. 2.

[25] – Servidor de pastas da UFPR. Acessado 16 de junho de 2018, as 01:29.

Link: https://docs.ufpr.br/~rudmar/refri/material/1_INTRODUCAO.pdf

[26] – Youtube: Canal HeatcraftWWR

Aula #08 – Ciclo Frigorífico – Refrigerando

Link: https://www.youtube.com/watch?v=NCy_R8qTxrQ&app=desktop

Consultado em 24 de junho de 2018 as 23:19.

[27] – Youtube: Canal HeatcraftWWR

Aula #07 – Propriedades Termodinâmicas – Refrigerando

Link: <https://www.youtube.com/watch?v=QzI1Gq7P7vw&app=desktop>

Consultado em 24 de junho de 2018 as 23:19.