

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
MBA EM ENGENHARIA E GESTÃO DE MANUFATURA E MANUTENÇÃO

ANÁLISE DAS CAUSAS RELACIONADAS À INDISPONIBILIDADE
DOS FORNOS DE PIRÓLISE DE UMA EMPRESA PETROQUÍMICA
PELA LIMPEZA DE TROCADOR DE CALOR

Anderson Luis Cassinoni de Oliveira

São Paulo
2013

Anderson Luis Cassinoni de Oliveira

**ANÁLISE DAS CAUSAS RELACIONADAS À INDISPONIBILIDADE
DOS FORNOS DE PIRÓLISE DE UMA EMPRESA PETROQUÍMICA
PELA LIMPEZA DE TROCADOR DE CALOR**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do certificado de
Especialista em Engenharia e Gestão de
Manufatura e Manutenção – MBA / USP

Orientador:

Prof. Dr. Gilberto Francisco M. de Souza

São Paulo
2013

RESUMO

Durante os últimos anos, a empresa petroquímica nacional sofreu com a alta frequência de intervenções de manutenção num dos seus principais equipamentos do processo produtivo, o Forno de Pirólise (ou de Craqueamento). Visando melhorar esse cenário, a empresa investiu pesado na gestão de seus processos internos utilizando como principal metodologia para aumentar a produtividade e a confiabilidade, o aprimoramento da Gestão da Manufatura (Produção) e das suas áreas de apoio (Matéria-Prima, Comercial e Suprimentos). Nesse contexto, o presente trabalho de monografia do curso MBA em Engenharia e Gestão de Manufatura e Manutenção tem o objetivo de identificar quais são as causas que afetam a disponibilidade desse tipo de equipamento e elaborar as ações que devem ser tomadas para melhorar esse cenário. Os Fornos de Pirólise foram escolhidos como instrumento de estudo desse trabalho, pois impactam diretamente na capacidade produtiva e possuem alto custo de manutenção, além de existir quantidade de dados e informação suficiente que possibilite sua análise. Os dados históricos do controle do processo e das intervenções de manutenção de 2011 serão utilizados para possibilitar a análise das causas tanto das ações de manutenção quanto das ações de processo. Somente o Forno de Pirólise de modelo de Tempo de Residência Pequeno IV ou *Short Time Residence IV* (SRT IV) será analisado para evitar conclusões errôneas e ações improdutivas, além de permitir o término do trabalho dentro do prazo.

Palavras Chave: Forno; Pirólise; Manufatura; Gestão.

ABSTRACT

During recent years, the national petrochemical company suffered from the high frequency of maintenance work on one of its main equipment in the production process, the Pyrolysis Furnace (or Cracking Heaters). To improve this scenario, the company invested heavily in the management of their internal processes using as the main methodology to increase productivity and reliability, improved Manufacturing Management (Production) and its support areas (Raw Material, Commercial, Supply Chain and etc.). In this context, this work monograph MBA in Engineering and Manufacturing Management and Maintenance aims to identify what are the causes that affect the availability of such equipment and elaborate the actions that should be taken to improve this scenario. The Pyrolysis Furnaces were chosen as study tool for this work because it directly impact the productive capacity and have high maintenance cost, plus there is much data and information sufficient to enable analysis. The historical data of process control and maintenance operations for 2011 will be used to enable analysis of the causes of both maintenance actions as the actions of process. Only the Pyrolysis Furnace Model SRT IV will be analyzed to avoid erroneous conclusions and actions unproductive, besides allowing the completion of the work on time.

Key words: Furnace; Pyrolysis; Manufacturing; Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Capacidade produtiva da empresa sede do estudo.....	13
Figura 2: Fluxograma simplificado da empresa petroquímica.....	14
Figura 3: Reações de desidrogenação e craqueamento que ocorrem no Forno de Pirólise	14
Figura 4: Esquema do Forno de Pirólise.....	15
Figura 5: Esquema do TLE, do “Y”, do “Y” e Plugue do “Y”	17
Figura 6: Detalhe do Plugue do “Y” do TLE	18
Figura 7: Representação do ciclo proposto pela metodologia DEMAIC	21
Figura 8: Representação da análise de Diagramas de Correlação	22
Figura 9: Exemplo de construção do Diagrama de Ishikawa.....	26
Figura 10: Representação de um Gráfico de Pareto	27
Figura 11: Exemplo representativo da Matriz de Causa e Efeito.....	28
Figura 12: Representação da Matriz de Esforço e Impacto	28
Figura 13: Representação da aplicação da Matriz de Esforço e Impacto	29
Figura 14: Exemplo de construção de uma Árvore de Falha.....	30
Figura 15: Representação de <i>Box Plot</i>	31
Figura 16: Temperatura de saída do TLE após manutenção em diversos fornos	32
Figura 17: Fluxo e ferramentas utilizadas no desenvolvimento desse trabalho.....	32
Figura 18: Mapa do Processo das etapas de operação e manutenção do Forno de Pirólise	33
Figura 19: Diagrama de Espinha de Peixe da Limpeza do TLE	35
Figura 20: Matriz de Causa e Efeito das causas potenciais e seus respectivos índices de Esforço e Impacto avaliados pelo grupo	36
Figura 21: Representação gráfica da Matriz de Esforço e Impacto das causas potenciais.....	37
Figura 22: Árvore de Falhas para a causa “Refratário dos cones e saias danificados”	38
Figura 23: Árvore de Falhas para a causa “Plugue travado”	39
Figura 24: Mudança do projeto da ponteira da ferramenta de hidrojateamento.....	41

Figura 25: Progresso na limpeza da parede interna do tubo do TLE	42
Figura 26: Cone do TLE e acompanhamento da aplicação do refratário ao cone	43
Figura 27: <i>Check list</i> elaborado para adequação das documentações dos trabalhos de TLE.....	44
Figura 28: <i>Check-list</i> de entrega do equipamento pós-manutenção.....	46
Figura 29: Gráfico de Correlação entre o tempo de campanha e a temperatura de início de campanha do TLE	47
Figura 30: Capacidade do processo da temperatura de saída do TLE antes do projeto.....	48
Figura 31: Capacidade do processo da temperatura de saída do TLE depois do projeto.....	48
Figura 32: <i>Box Plot</i> da temperatura de entrada do TLE antes e depois do trabalho	49
Figura 33: <i>Box Plot</i> do tempo de campanha dos fornos antes e depois do projeto.....	50
Figura 34: Formulário de controle de limpeza do TLE	51
Figura 35: Avaliação por videoscopia dos tubos do TLE após o hidrojateamento.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação das causas potenciais com baixo esforço e alto impacto.....	37
Tabela 2 – Acompanhamento dos planos de ação relacionados às causas potenciais	40
Tabela 3 – Evolução da temperatura de saída do TLE no início de campanha	49
Tabela 4 – Lista de causas potenciais para o procedimento 1.0 – Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação. Fonte: Arquivo da empresa	56
Tabela 5 – Lista de causas potenciais para o procedimento 2.0 – Saída/Retirada do Forno de Pirólise de operação para Decoque. Fonte: Arquivo da empresa	58
Tabela 6 – Lista de causas potenciais para o procedimento 3.0 – Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação após Decoque. Fonte: Arquivo da empresa	60
Tabela 7 – Lista de causas potenciais para o procedimento 4.0 – Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção. Fonte: Arquivo da empresa	61
Tabela 8 – Lista de causas potenciais para o procedimento 5.0 - Limpeza do TLE. Fonte: Arquivo da empresa.....	62
Tabela 9 – Lista de causas potenciais para o procedimento 6.0 - Limpeza da Zona de Convecção. Fonte: Arquivo da empresa.....	64
Tabela 10 – Lista de causas potenciais para o procedimento 7.0 - Manutenção/Reparo na Serpentina. Fonte: Arquivo da empresa.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB9	Alquilbenzeno 9
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COMPERJ	Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro
DEMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve e Control</i> ou Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar
EBITDA	<i>Earnings before Interest Taxes, Depreciation and Amortization</i> ou Lucros antes de Juros, Impostos, Depreciação e Amortização
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i> ou Análise da Árvore de Falhas
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> ou Organização Internacional de Padronização
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
LT	Linha de Transferência
NBR	Definição de Norma da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)
PCP	Planejamento e Controle de Produção
PDCA	<i>Plan, Do, Check and Act</i> ou Planejar, Executar, Verificar e Agir
SRT	<i>Short Residence Time</i> ou Tempo de Residência Pequeno
TLE	<i>Transfer Line Exchanger</i> ou Trocador de Calor da Linha de Transferência

LISTA DE SÍMBOLOS

σ Sigma

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.2. FORNO DE PIRÓLISE OU DE CRAQUEAMENTO E EQUIPAMENTOS AUXILIARES	14
1.3. RESULTADOS ESPERADOS	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. FERRAMENTAS PARA O ESTUDO E MELHORIA DE DESEMPENHO	21
3. METODOLOGIA	32
3.1. ANÁLISE DOS DADOS	33
3.2. DESDOBRAMENTO DAS AÇÕES	39
3.2.1. ALTERAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DO TLE	41
3.2.2. REPOSIÇÃO DE REFRAATÁRIO EM COMPONENTES DO TLE	42
3.2.3. ELABORAÇÃO DE LISTA DE VERIFICAÇÃO PADRONIZADA	43
3.2.4. DEDICAÇÃO EXCLUSIVA NA LIBERAÇÃO DO EQUIPAMENTO	44
3.2.5. MELHORIA NA ETAPA DE ENTREGA DO FORNO DE PIRÓLISE	45
3.3. AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46
3.3.1. CONTROLE E MANUTENÇÃO DOS RESULTADOS	50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICE A – LISTA DE CAUSAS POTENCIAIS DE CADA ETAPA DOS PROCEDIMENTOS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO	56

1. INTRODUÇÃO

A importância econômica do setor químico pode ser avaliada por meio de alguns números. A indústria química representa cerca de 3% do PIB brasileiro, cuja maioria do controle está em mãos do capital privado nacional. Ela gera um valor agregado anual de cerca de US\$ 10 bilhões. A indústria petroquímica é, individualmente, o maior segmento do setor químico, respondendo por dois terços do total do seu faturamento. Ocupa a oitava posição na classificação do ramo petroquímico mundial (SOUZA, 2007).

De acordo com KLEIN (2011), considerando a diversidade de aplicações dos produtos petroquímicos, que estão inseridos praticamente em tudo, inclusive em artigos de higiene pessoal e limpeza, o grande poder multiplicador dessa indústria é, sem dúvida, seu diferencial econômico.

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A fim de aproveitar sinergias de infraestrutura e de integração operacional, minimizando custos, na maioria dos países a indústria petroquímica se organiza em pólos industriais. Por conta dos altos aportes financeiros, a criação de um polo exige estudos técnicos e econômicos detalhados minuciosamente.

Em 1964, iniciou-se o desenvolvimento da indústria petroquímica no Brasil, com o estabelecimento de orientações e diretrizes para o desenvolvimento dos pólos petroquímicos. Entre as décadas de 1970 e 1980, em virtude do programa de substituição de importações, foram criados os três principais pólos petroquímicos: em Mauá e Santo André (São Paulo), Camaçari (Bahia) e Triunfo (Rio Grande do Sul).

De acordo com KLEIN (2011), quando iniciados, as empresas e os pólos petroquímicos foram baseados em um modelo denominado tripartite (semelhante ao aplicado nas *joint-ventures*¹). O controle era compartilhado pela empresa Petroquisa (subsidiária da Petrobras), por sócios privados nacionais e por capital privado estrangeiro (que, normalmente, aportava a tecnologia). Desta forma, garantia-se,

¹ *Joint Venture* é a palavra utilizada para expressar a união de duas ou mais empresas que tenham o mesmo objetivo econômico, o lucro.

simultaneamente, o controle nacional e privado e o suporte tecnológico indispensável aos novos empreendimentos.

Atualmente, os principais pólos petroquímicos, são: Polo Petroquímico do Grande ABC (SP), Polo Petroquímico de Camaçari (BA), Polo Petroquímico de Triunfo (RS) e Polo Petroquímico de Duque de Caxias (RJ). Outros novos complexos petroquímicos vêm sendo incorporados, como: o COMPERJ (Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro), em Itaboraí (RJ), cujo início de sua operação está previsto para 2014; e o Complexo Industrial Petroquímico de Suape, em Ipojuca (PE).

De acordo com KLEIN (2011), a instalação de um polo constitui-se de uma única central geradora de produtos básicos ou de primeira geração. Além desta, há empresas de segunda geração (produtos derivados) e as indústrias de terceira geração (produtos finais), cujas fábricas também podem estar localizadas em regiões mais distantes.

Os produtos de primeira geração são resultantes da primeira transformação de correntes petrolíferas (nafta², gás natural, entre outros) por processos químicos (craqueamento a vapor, pirólise ou reforma catalítica). Os principais produtos primários ou básicos são as olefinas (etileno e propileno) e os aromáticos (benzeno, tolueno e xilenos). Também são gerados solventes e combustíveis, como produtos secundários.

A segunda geração constituiu-se de empresas produtoras de resinas termoplásticas (polietilenos e polipropilenos) e de intermediários (produtos resultantes do processamento dos produtos primários).

As empresas de terceira geração ou de transformação fornecem embalagens, peças e utensílios para os segmentos de alimentação, construção civil, elétrico, eletrônico, automotivo, entre outros.

A empresa que sedia o estudo em questão desta monografia é a maior produtora de resinas termoplásticas das Américas, com unidades fabris instaladas no Brasil e Estados Unidos das Américas e possui capacidade produtiva de petroquímicos básicos (como Etileno, Propileno, Butadieno e Benzeno), Solventes (como Solvente

² Nafta é uma substância química derivado do petróleo e que é a principal matéria-prima da indústria petroquímica.

Alquilbenzeno 9 e Xilenos Mistos) e Combustíveis (como Gasolina Automotiva, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e Óleo Combustível) conforme lista de produtos relacionados na Figura 1.

Produto	total (ton/ano)
Eteno verde	200.000
Eteno	3.779.000
Propeno	1.590.000
Butadieno	366.000
Corte C4	52.000
Buteno-1	95.000
Gasolina Automotiva	1.260.000
ETBE	387.000
Benzeno	969.000
Cumeno	320.000
Para-Xileno	207.000
Xilenos Mistos	166.000
Orto-Xileno	124.000
Tolueno	195.000
Corrente Tolueno-Xileno	99.000
Caprolactama	60.000
Ciclohexano	75.000
Isopreno	26.000
Diciclopentadieno	33.000
Piperileno	29.000
Noneno Tetramero	54.000
Resina Hidrocarbônica	19.000
Isobuteno	36.000
Polisobuteno	36.000
Propano Alta Pureza	16.000
Solvente Alifático C6	52.000
Coperaf-1	130.000
Rafinado C6 C8	63.000
Solvente AB9	39.000
C9 Pirólise	94.000
Alquilbenzeno	24.000
Aguarrás	44.000
GLP	18.000
Óleo Petroquímico BTE	80.000
Gasóleo	35.000
Óleo Combustível	30.000
Matéria-prima Negro-de-Fumo	140.000

Figura 1: Capacidade produtiva da empresa sede do estudo

Fonte: <<http://www.braskem.com.br/catalogo201303/>>. Acesso em: 24 nov. 2012

A indústria petroquímica de primeira geração tem as seguintes etapas principais do seu processo produtivo demonstradas na Figura 2 e o presente trabalho focará no equipamento contido na etapa destacada e chamada de Craqueamento nos Fornos.



Figura 2: Fluxograma simplificado da empresa petroquímica

1.2.FORNO DE PIRÓLISE OU DE CRAQUEAMENTO E EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Nos últimos anos a empresa petroquímica cujo estudo será desenvolvido sofreu com a indisponibilidade de um dos principais equipamentos do processo produtivo, o Forno de Pirólise (ou Forno de Craqueamento cuja função é quebrar as cadeias de carbono de substâncias por meio de temperatura).

O Forno de Pirólise é o equipamento responsável pelo craqueamento e desidrogenação (retirada do elemento hidrogênio da molécula química) dos hidrocarbonetos saturados³ contidos na matéria-prima (Nafta) de alimentação, para formar os produtos olefínicos (produtos básicos da indústria petroquímica como etileno e propileno) e aromáticos (produtos básicos da indústria petroquímica como benzeno, tolueno e xilenos) desejados. A Figura 3 apresenta algumas reações de craqueamento e desidrogenação que ocorrem no Forno de Pirólise.

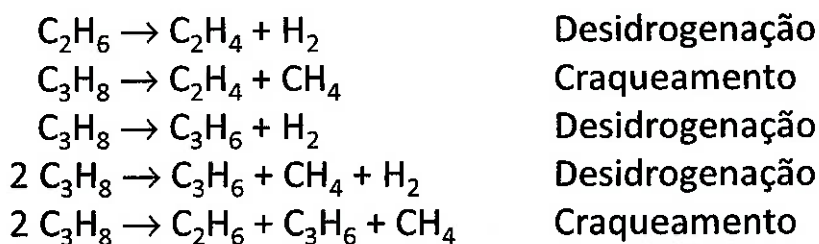


Figura 3: Reações de desidrogenação e craqueamento que ocorrem no Forno de Pirólise

A Nafta entra no forno por uma tubulação (que também é chamada de serpentina) na Zona de Convecção⁴ e é pré-aquecida. Logo após atravessar essa região recebe a adição de vapor d'água de diluição⁵, imediatamente antes de entrar na Zona de

³ Hidrocarbonetos saturados são substâncias são constituídas pela ligação simples dos elementos químicos carbono e hidrogênio.

⁴ Zona de Convecção é a seção do Forno de Pirólise que promove a recuperação de energia gerada pela a queima do gás combustível nos queimadores ou também chamados de maçaricos. Na Zona de Convecção ocorre o pré-aquecimento da Nafta e da Água de Alimentação.

⁵ Vapor D'água de Diluição é a própria água, porém no estado gasoso e que tem a função de diluir a Nafta que entra no Forno de Pirólise.

Radiação (seção que ocorre a transferência de calor da queima do gás combustível para as serpentinas por radiação – propagação de energia). Essa mistura é aquecida até temperatura de $790\text{ }^{\circ}\text{C}$ para promover o craqueamento e a reação de desidrogenação na Zona de Radiação como representado na Figura 4. A temperatura de reação é obtida através da queima de gás combustível nos maçaricos situados nas paredes laterais do forno.

A mistura de Nafta e vapor de diluição reagida deixa o forno pela Zona de Radiação e sofre o abaixamento rápido da temperatura no Trocador de Calor da Linha de Transferência ou *Transfer Line Exchanger* (TLE) para cessar o processo reacional. A faixa operacional de temperatura na saída do TLE varia de $390\text{ }^{\circ}\text{C}$ no início de campanha (partida do equipamento) até $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ no final de campanha (parada do equipamento). Essa mistura já com temperatura reduzida segue para a unidade de recuperação de energia através da Linha de Transferência (LT) e seguirá na cadeia do processo produtivo, conforme apresentado na Figura 4.

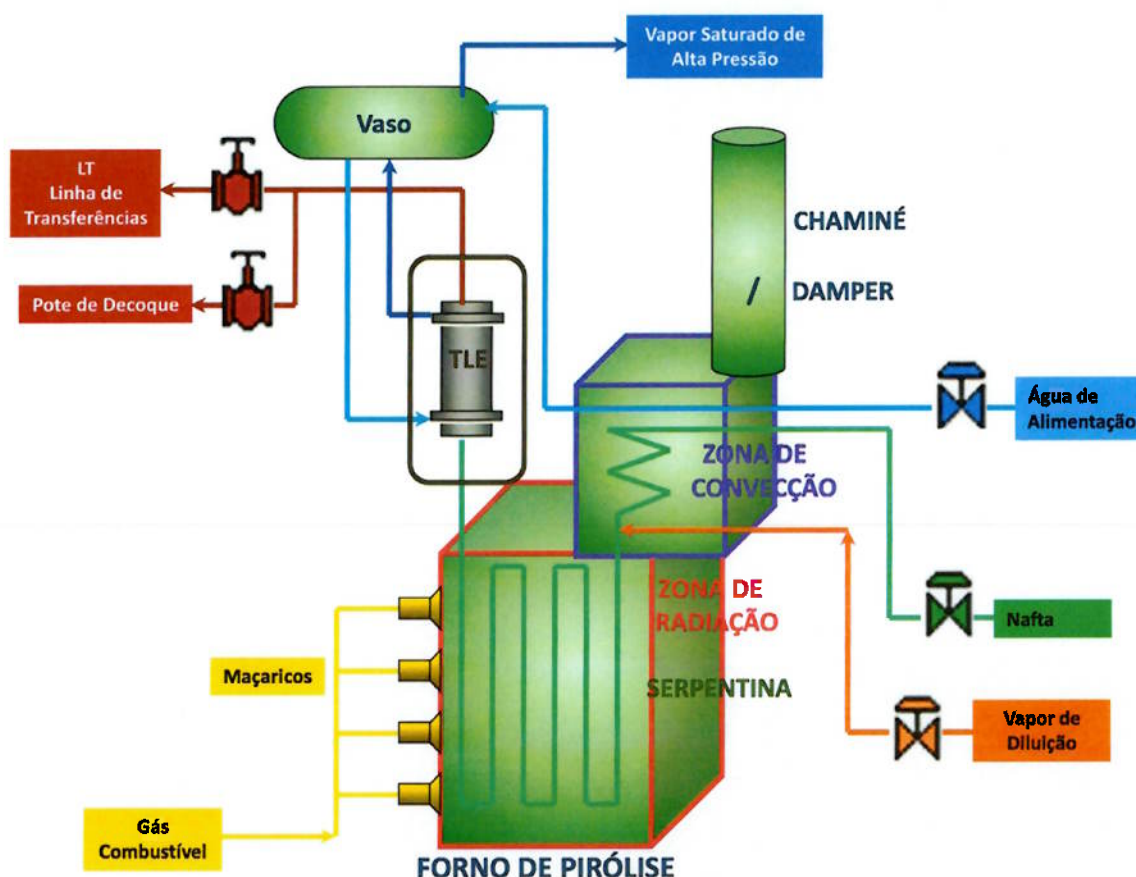


Figura 4: Esquema do Forno de Pirólise

Na Figura 4 também é apresentado outro encaminhamento logo após a saída do TLE, o Pote de Decoque⁶, o qual é utilizado no procedimento de Decoque da serpentina e do TLE do Forno de Pirólise. Esse procedimento é realizado sempre que no final de campanha (parada) Forno de Pirólise devido à perda de eficiência na troca térmica causada pela formação de coque⁷ no interior da serpentina e no TLE.

Como pode ser observado na Figura 4, o equipamento TLE também é responsável pela produção de vapor d'água saturado de alta pressão e temperatura, 126 kgf/cm² e 327 °C, respectivamente, através do processo de termosifão⁸ que acontece entre dois sistemas, o vaso (ou balão) e o TLE. O vapor é gerado pré-aquecendo a água de alimentação que entra no forno e passa pela Zona de Convecção. A água de alimentação que está no vaso (ou balão) é encaminhada para o casco do TLE e recupera a energia da mistura de vapores de Nafta e vapor de diluição que passa pelo o lado dos tubos do TLE. Com a temperatura mais alta e menos densa, a água de alimentação finaliza o processo de termosifão ascendendo novamente ao vaso (ou balão) de vapor, onde gera o vapor d'água saturado. Posteriormente, o Vapor Saturado de Alta Pressão é enviado para o Forno de Superaquecimento, que promove a elevação da temperatura até 510 °C superaquecendo o vapor. Essa corrente é utilizada na empresa para gerar energia elétrica através do acionamento da turbina de um gerador.

A Figura 5 mostra esquematicamente o Trocador da Linha de Transferência (TLE) e seus componentes mais importantes, como os Cones Superior e Inferior, o "Y", o Plugue do "Y", o Casco e as tubulações de entrada e saída tanto do lado dos tubos por onde passa a mistura de Nafta e vapor d'água de diluição quanto do lado casco por onde passa a água de alimentação. Entretanto, no casco encontra-se também um conjunto de tubos que forma o feixe tubular.

⁶ Decoque é o processo de regeneração da serpentina do forno por meio de injeção de ar para queimar o coque.

⁷ Coque é formação de um aglomerado de carbono oriundo do processo de craqueamento da Nafta.

⁸ Processo de Termosifão consiste em recuperar energia de um sistema que cede calor e utilizar em outro sistema que necessita desse calor através da mudança de temperatura de um fluido. Essa diferença de temperatura promove uma circulação natural entre dois sistemas dispostos verticalmente um acima do outro e interligados por duas tubulações.

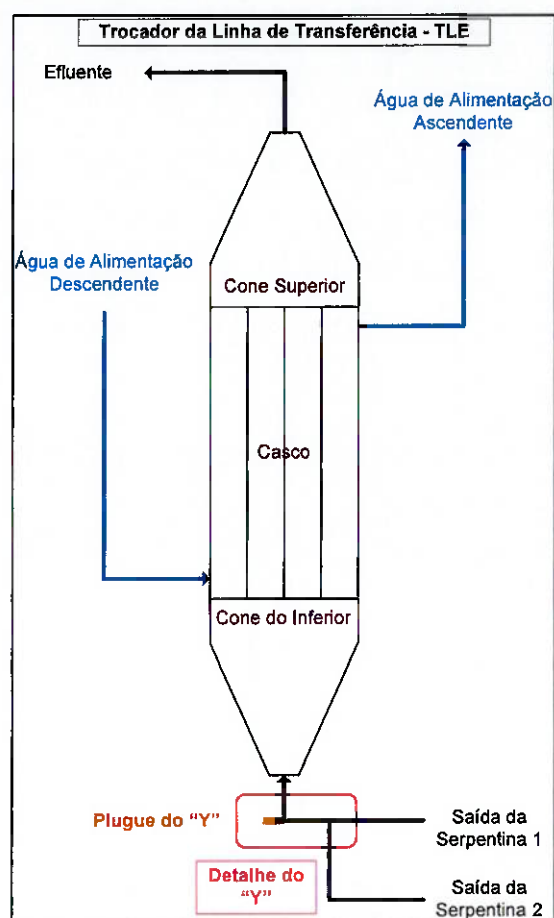


Figura 5: Esquema do TLE, do "Y", do "Y" e Plugue do "Y"

A junção das tubulações de saída das duas serpentinas do Forno de Pirólise até a entrada do cone inferior chama-se de "Y" devido a semelhante forma de sua instalação física com a letra "Y" do alfabeto. Também devido ao seu arranjo físico de "Y" e ao tipo de produto processado faz-se necessário complementar a instalação com um dispositivo chamado de Plugue do "Y", onde se efetua a injeção de vapor de diluição para evitar que ocorra a formação de coque⁹ na curva da tubulação antes de entrar no cone inferior do TLE. A Figura 6 mostra uma visão superior do detalhe desse arranjo.

⁹ Coque é formação de um aglomerado de carbono oriundo do processo de craqueamento da Nafta.

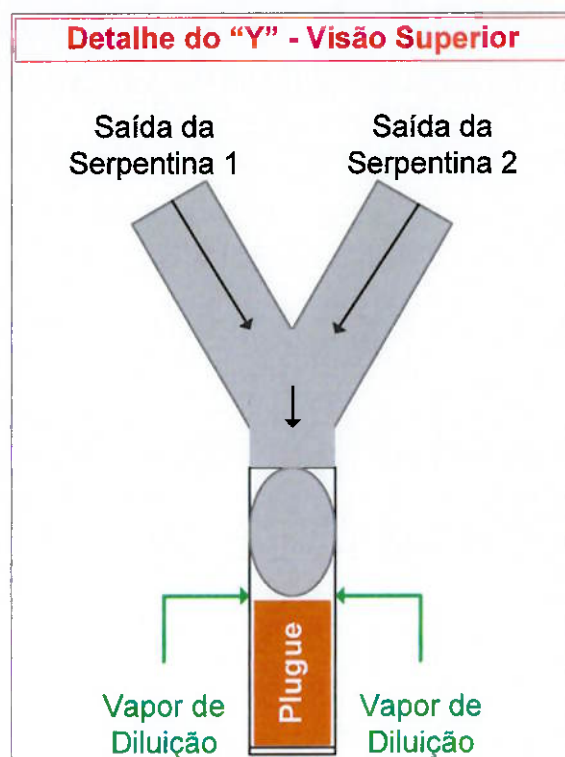


Figura 6: Detalhe do Plugue do "Y" do TLE

A remoção do Plugue do "Y" é realizada em uma etapa do processo de manutenção do TLE para possibilitar a limpeza do coque desse arranjo de tubulações.

1.3. RESULTADOS ESPERADOS

Devido ao efeito negativo causado pela indisponibilidade dos Fornos de Pirólise para o resultado da empresa definiu-se um grupo multidisciplinar para analisar os dados das condições operacionais do histórico referente ao ano de 2011. Os processos de manutenção e de produção relacionados ao conjunto de periféricos que compõem o Forno de Pirólise foram analisados com o intuito de identificar quais são as principais causas que afetaram a confiabilidade e a disponibilidade do mesmo, comprometendo a carga processada e o volume produzido.

Devido a grande complexidade de funcionamento dos Fornos de Pirólise e para que pudesse chegar a um resultado plausível durante o ano de 2012, as atividades de manutenção foram subdivididas em 3 escopos de trabalho¹⁰:

A. Aumento da qualidade das intervenções de limpeza de TLE;

¹⁰ No item 3 serão apresentados a metodologia e a análise realizada para definir os 3 escopos.

B. Aumento da eficiência energética por limpeza da Zona de Convecção;

C. Redução do tempo de manutenção em serpentinas.

Já as atividades relacionadas à operação (manufatura/produção) do forno serão tratadas por outras equipes da empresa.

No desdobramento desse projeto, a empresa reuniu uma equipe multidisciplinar que contivesse no mínimo um responsável por cada atividade envolvida nos escopos de trabalho já citado acima, sendo que o escopo de trabalho representado pela letra “A” foi escolhido como tema dessa presente monografia.

O objetivo principal da equipe é melhorar o resultado da empresa efetuando pequenas melhorias nos processos e atividades envolvidas em cada tarefa, como por exemplo, revisão de procedimento, implantação de lista de verificação e melhoria no ferramental através da mudança de seu projeto.

Resumidamente, o resultado esperado desse projeto é reduzir o custo das intervenções de limpeza no TLE do Forno de Pirólise SRT IV, através da melhor Gestão de Processos das atividades de manutenção e manufatura e observado no aumento do tempo de campanha, ou seja, aumento do período expresso em dias de funcionamento desse equipamento no processo produtivo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Rocha (2008), administrar a produção significa lidar com meios de produção (matéria-prima, equipamento e mão de obra), obtendo a funcionalidade que permite conseguir bens com qualidade assegurada e no montante correspondente aos recursos usados.

A produção é o ato de fazer ou construir algo que atenda a um consumidor. Para que ela seja operacionalizada, é necessário utilizar adequadamente as funções gerenciais de planejamento, organização, comando, coordenação e controle. Rocha (2008) ainda cita que o profissional que lida com produção deve se preocupar com operações simplificadas, com qualidade dos produtos, com a necessidade dos clientes e com a valorização profissional e pessoal dos colaboradores, motivando as pessoas para que desenvolvam seu trabalho da melhor forma possível.

Segundo os princípios da Gestão da Qualidade abordados nas normas (NBR) da Associação Brasileira de Normas Técnicas series 9000, ABNT NBR ISO 9000 (2005), cita que um resultado desejado é alcançado quando as atividades e os recursos relacionados são gerenciados como um processo.

De acordo com a ABNT NBR ISO 9004 (2010), a organização deve garantir a gestão proativa de todos os processos. A ISO 9004 (2010) ainda cita que os processos e seus relacionamentos devem ser revistos regularmente e devem ser tomadas ações adequadas para sua melhoria.

Segundo Netto (2011), os processos que utilizamos para obter nossos produtos também são afetados por variações que influenciam o resultado final.

Netto (2011) afirma que, todo processo tem muitas causas de variações da qualidade. A busca das causas de defeitos entre muitos fatores chama-se Diagnóstico do Processo. Se o Diagnóstico do Processo não for bem feito, no entanto, o processo pode melhorar momentaneamente, mas após algum tempo os defeitos tornam a aparecer e de forma pior que antes.

Netto (2011) menciona que os métodos estatísticos proporcionam meios eficazes para o aprimoramento tecnológico e o controle da qualidade de processos produtivos. Sendo que a habilidade de tratar os problemas do ponto de vista estatístico é mais importante do que as ferramentas individuais.

2.1. FERRAMENTAS PARA O ESTUDO E MELHORIA DE DESEMPENHO

Segundo Carvalho e Paladini (2005), um programa recente de Gestão da Qualidade surgiu no final da década de 1980, na empresa Motorola, chamado Seis Sigma. O programa apresenta várias características dos modelos anteriores, com o pensamento típico da época de maior ênfase do controle da qualidade e na análise e soluções de problemas.

A metodologia Seis Sigma tem como foco a melhoria dos processos, isto é, identificar e eliminar as causas que levam o processo a variar ao longo do tempo, gerando defeitos. Na implantação do método, existe uma preocupação com o uso sistemático das ferramentas estatísticas, seguindo um ciclo que representa as etapas de Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar (ou em inglês *Define, Measure, Analyze, Improve* e *Control*, conhecido como DMAIC e apresentado na Figura 7), o que também remete ao ciclo que representa as etapas Planejar, Executar, Verificar e Agir (ou do inglês *Plan, Do, Check* e *Act*, da sigla PDCA). É importante ressaltar, contudo, que este método vai além do pensamento estatístico, pois promove um alinhamento estratégico da qualidade desdobrada em projetos prioritários. Além disso, existe forte ênfase na relação ao custo-benefício destes projetos, cujo ganho, em algumas empresas, soma cifras expressivas.

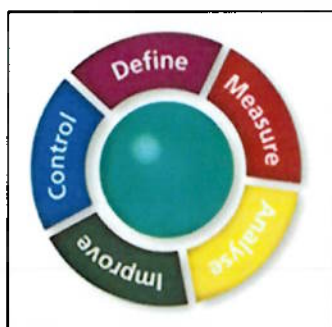


Figura 7: Representação do ciclo proposto pela metodologia DMAIC

Fonte: <<http://daqualidade.blogspot.com.br/2011/11/o-pdca-e-o-six-sigma-dmaic-sao.html>>. Acesso em: 10 jan. 2013

As ferramentas associadas à metodologia DMAIC empregadas neste trabalho estão mencionadas abaixo.

- Mapa do Processo: Segundo Cantarelli (2011) o Mapa do Processo é a ilustração gráfica do processo de modo mais simples que o mapa da cadeia de

valor. Na representação gráfica serão identificadas todas as etapas e as entradas principais do processo e os requisitos do cliente. Como resultado do uso desta ferramenta é possível identificar gargalos e oportunidades para eliminar etapas e otimizar recursos.

- Gráfico de Correlação (ou Diagrama de Dispersão): Cantarelli (2011) também cita que o Gráfico de Correlação permite relacionar duas variáveis em dois eixos (X – abscissa e Y - ordenada) e mostrar se existe uma correlação entre estas duas variáveis, podendo esta ser uma correlação positiva, negativa ou nula, como ilustrado na Figura 8.

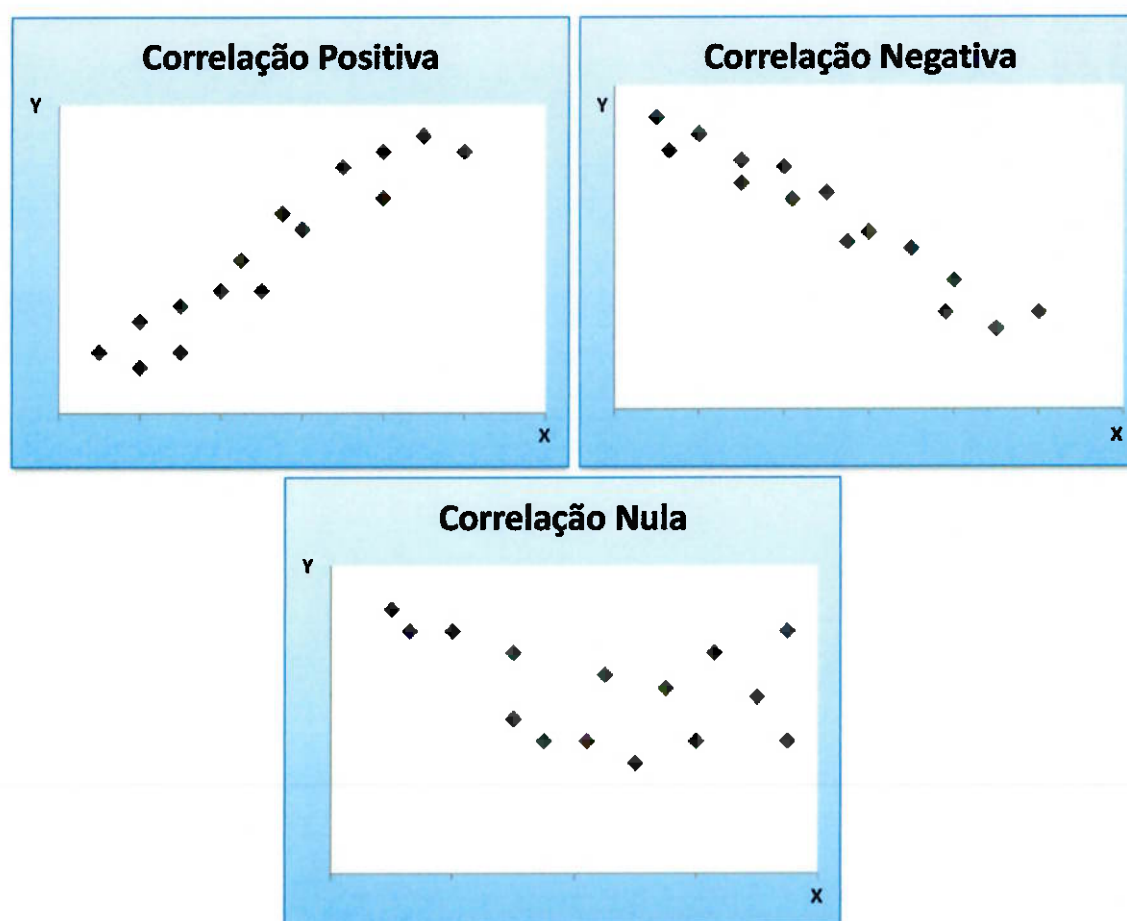


Figura 8: Representação da análise de Diagramas de Correlação
Fonte: Elaborado pelo autor

A variável indicada no eixo Y é a variável independente e a variável indicada no eixo X é a variável dependente.

Segundo Cantarelli (2011), esta ferramenta pode ser utilizada quando os dados de X e Y são contínuos, ou seja, quando forem dados quantitativos que assumem valores em um intervalo contínuo de números.

Uma vez que os dados de X e Y são coletados e plotados é possível avaliar a existência de correlação. Caso os dados fiquem alinhados no gráfico, é possível dizer que existe correlação entre as variáveis. Além disto, existe alta probabilidade da fonte de variação analisada (X), ter impacto significativo sobre a saída de processo estudada (Y). Caso os dados fiquem alinhados de modo que quanto maiores os valores de X, maiores os valores de Y, é dito que existe uma correlação positiva. Caso os dados fiquem alinhados de forma que quanto maior os valores de X, menores os valores de Y, é dito que existe uma correlação negativa. Se nenhuma tendência for observada, é dito que a correlação é nula.

- Capacidade do Processo: Segundo Netto (2011), para cada processo, o valor desejado de uma característica é especificado como valor nominal (valor meta). A variação tolerável em torno deste valor é identificada como o intervalo de especificação (ou faixa de tolerância), que é delimitado pelo Limite Inferior de Especificação (LIE) e Limite Superior de Especificação (LSE).

De acordo com Carvalho e Paladini (2005), o índice utilizado para determinar a capacidade Seis Sigma é bastante simples, pois mede a distância da média à especificação mais próxima ao LIE ou ao LSE em quantidades de desvios-padrão (sigmas), utilizando a normal reduzida. Um processo perfeitamente centrado e cuja média dista 6σ (seis sigma) dos limites de especificação gera 2 defeitos por 1 bilhão de oportunidades.

Para Carvalho e Paladini (2005), para gerir a qualidade segundo uma perspectiva de redução da variabilidade dos processos, exige-se da empresa a adoção sistemática de técnicas de controle estatístico e estudo dos índices de capacidade (ou Capabilidade). Segundo Netto (2011), os índices da capacidade do processo são:

A. Índice de Capacidade Potencial do Processo (C_p)

$$C_p = \frac{\text{Tolerância}}{\text{Dispersão}} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{(LSE - LIE)}{6\sigma} \quad (2)$$

Onde:

LSE = Limite Superior de Especificação;

LIE = Limite Inferior de Especificação;

σ = Desvio Padrão estimado.

Quando o valor de C_p é menor que 1, representa que o processo é incapaz de atender às especificações, pois a dispersão é maior que a tolerância.

Quando o valor de C_p é maior ou igual a 1, isto representa que o processo é potencialmente capaz, pois tem condições de produzir itens dentro dos limites da especificação. No entanto, a capacidade só será confirmada se o processo estiver centralizado.

B. Índice de Capacidade do Processo (C_{pk})

Este índice apresenta vantagens com relação ao C_p , pelo fato de abordar tanto os aspectos de dispersão como o de centralização do processo.

A fórmula do índice C_{pk} é dada por:

$$MIN \left(\frac{LSE - m}{3\sigma}; \frac{m - LIE}{3\sigma} \right) \quad (3)$$

Onde:

LSE = Limite Superior de Especificação;

LIE = Limite Inferior de Especificação;

m = Média do processo;

σ = Desvio Padrão estimado.

Para avaliação do cálculo deste índice considera-se:

- Processo incapaz: $C_{pk} < 1$;
- Processo aceitável: $1 \leq C_{pk} \leq 1,33$;
- Processo capaz: $C_{pk} > 1,33$.

Sendo assim, quanto mais estreita a curva da distribuição, menor a variação e maiores os valores dos índices C_p e C_{pk} . É sabido ainda que quanto maior o valor de C_p e C_{pk} , melhor é o status do processo.

- Diagrama de Espinha de Peixe: É uma técnica criada por Ishikawa em 1943 e é conhecida por vários nomes: diagrama causa-efeito, diagrama espinha de peixe, diagrama 4P e diagrama 6M.

Segundo Rocha (2008) este diagrama procura identificar causas relacionadas a um determinado efeito. Este diagrama também é chamado de Ishikawa. As possíveis causas são identificadas dentro de categorias como: Matéria-Prima, Mão de Obra, Máquinas, Método, Materiais e Meio Ambiente. As análises somente serão encerradas quando forem detectadas as causas potenciais que contribuem efetivamente para o problema. Daí então, as ações de correção devem ser implementadas.

Segundo Cantarelli (2011), esta é uma ferramenta que permite a uma equipe explorar, identificar e demonstrar graficamente, todas as potenciais causas relacionadas a um problema, a fim de identificar as causas raiz, ilustrado na Figura 9.

De acordo com Cantarelli (2011), para uso da ferramenta, basicamente os seguintes passos devem ser seguidos:

1. Defina o problema de forma clara e objetiva.
2. Encontre o maior número de possíveis causas para o problema através de um brainstorming da equipe envolvida;
3. Construir o diagrama de causa e efeito:
 - Coloque o problema no quadro à direita;
 - Defina as categorias de causas mais apropriadas;
 - Registre os resultados do *brainstorming*¹¹;
 - Para cada causa questione “Por que isto acontece?” até 5 vezes, relacionando as respostas com a causa principal.
4. Analise o diagrama construído e identifique as causas que aparecem repetidamente;
5. Obtenha consenso do grupo ou utilize a técnica de votação e analise os dados para determinar a frequência das causas mais prováveis e selecionar

¹¹ *Brainstorming* é uma técnica utilizada para geração coletiva de ideias através da contribuição do grupo.

as causas de maior importância. Com a equipe determine 3 a 5 causas mais prováveis.

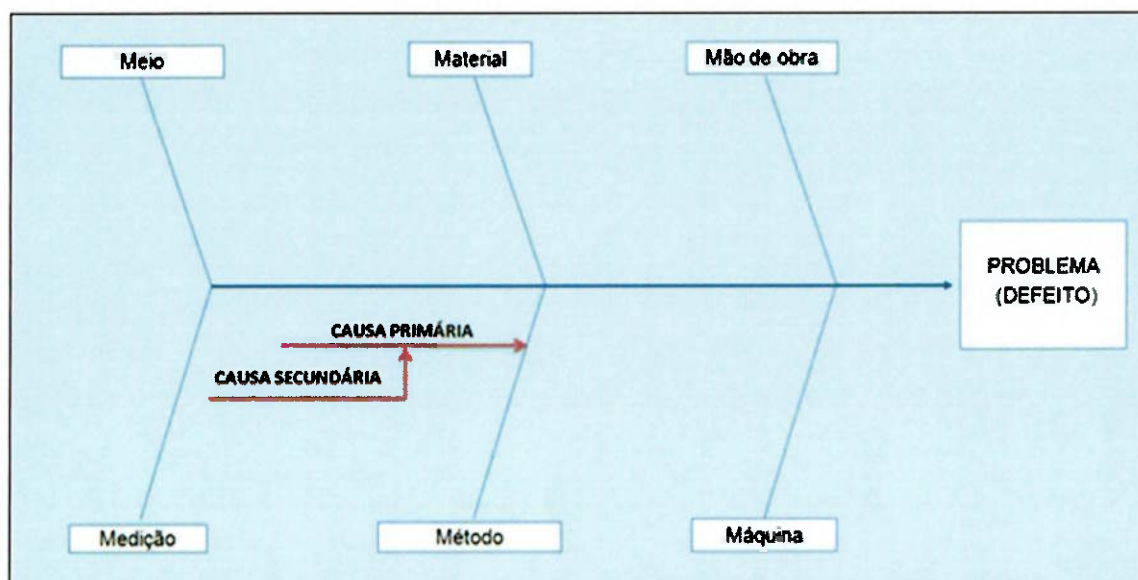


Figura 9: Exemplo de construção do Diagrama de Ishikawa
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Gráfico de Pareto:** De acordo com Netto (2011), os problemas de qualidade apresentam-se em termos de perdas (itens defeituosos ou seu custo) e a maior parte das perdas é devido a alguns tipos de defeitos, os quais podem ser atribuídos a um número bem pequeno de causas. Segundo Cantarelli (2011), o gráfico de Pareto ajuda a focalizar os esforços naqueles problemas que oferecem maior oportunidade de melhoria, por apresentar como se relacionam em um gráfico de barras. A teoria de Pareto afirma que 80% dos defeitos relacionam-se a 20% das causas potenciais.

Conforme Cantarelli (2011), o Gráfico de Pareto é uma técnica que separa os poucos problemas vitais dos muitos triviais, indicando graficamente por meio de colunas dispostas em ordem decrescente, representando cada categoria de dados como mostrado na Figura 10.

O evento que ocorre com maior frequência é representado na extrema esquerda e os demais representados em forma decrescente para a direita. É usual colocar a "frequência" no eixo vertical esquerdo e a "frequência acumulada relativa" no eixo vertical direito. Com base nesta, desenha-se uma curva cumulativa de porcentagem, a partir da barra maior. A visualização dessa curva permite concluir, com maior

facilidade, sobre quais são as causas que correspondem aos "poucos problemas vitais".

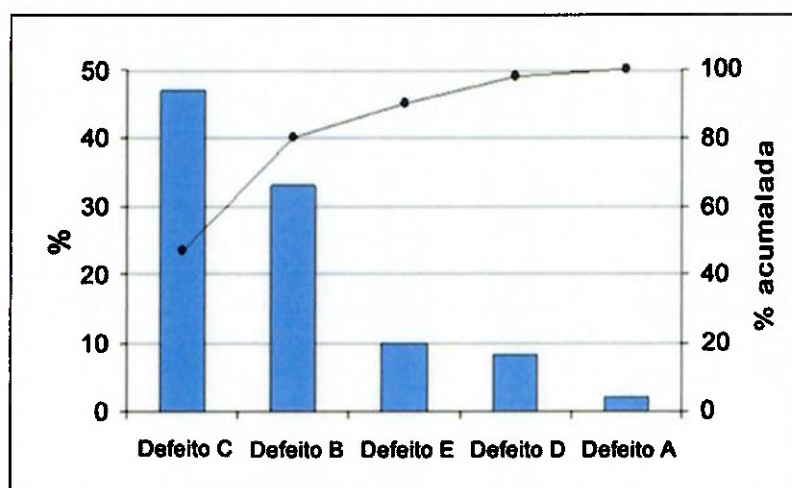


Figura 10: Representação de um Gráfico de Pareto
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Matriz de Causa e Efeito:** Conforme Cantarelli (2011), esta técnica serve para priorizar as possíveis causas do não atendimento às Características Críticas para a Qualidade (CTQ's), para posterior coleta de dados e ataque às fontes potenciais de variação. As etapas necessárias para construção desta matriz são:

1. Listar as causas prováveis levantadas no diagrama de Causa e Efeito;
2. Construir a Matriz de Causa e Efeito listando todos os CTQ's e as respectivas causas prováveis associadas;
3. Determinar pesos (ou índice de importância) para cada CTQ's e respectivas causas prováveis (hipótese "x" do processo), e fazer o produto destes;
4. Priorizar as ações de melhoria segundo a pontuação total obtida.

Os pesos indicados para cada CTQ's irá depender da importância que a característica crítica em questão tem para o cliente. O peso para suas respectivas hipóteses "x" será identificado conforme a correlação entre os CTQ's e "x" em questão da forma ilustrada na Figura 11.

Índices de Importância		10	9	8	...	TOTAL
Causas prováveis		CTQ1	CTQ2	CTQ3	...	
x1	Causa Provável 1	5	4	3	=	$(5 \cdot 10 + 4 \cdot 9 + 3 \cdot 8) = 110$
x2	Causa Provável 2	4	3	2	=	$(4 \cdot 10 + 3 \cdot 9 + 2 \cdot 8) = 83$
x3	Causa Provável 3	3	2	1	=	$(3 \cdot 10 + 2 \cdot 9 + 1 \cdot 8) = 56$
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	

Figura 11: Exemplo representativo da Matriz de Causa e Efeito
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Matriz de Esforço e Impacto:** Segundo Cantarelli (2011), a Matriz de Causa e Efeito pode ser completada pela Matriz de Esforço e Impacto, onde o grupo avaliará para cada entrada, quais são aquelas em que vale à pena começar a tomar ações para reduzir os defeitos no processo, coletar os dados para as análises e empreender recursos (tempo, dinheiro e pessoas) para estudar o fator como representado na Figura 12.

		IMPACTO	
		ALTO	BAIXO
ESFORÇO	ALTO	PODE REQUERER INVESTIMENTOS, MAIORES ESFORÇOS E CUSTOS ELEVADOS	PODE REQUERER INVESTIMENTOS, MAIORES ESFORÇOS E CUSTOS, ALÉM DE NÃO TRAZER IMPACTOS TÃO SENSÍVEIS
	BAIXO	FOCO! AÇÕES DE MENOR ESFORÇO QUE PODEM TER GRANDE IMPACTO DE MELHORIA	EVENTUAIS AÇÕES DE MENOR ESFORÇO, QUE PODEM TRAZER IMPACTOS SIGNIFICATIVOS

Figura 12: Representação da Matriz de Esforço e Impacto
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 13 demonstra a complementação da Matriz de Causa e Efeito com os resultados da Matriz de Esforço e Impacto.

Índices de Importância		10	9	8	...	TOTAL	ESFORÇO DE ELIMINAÇÃO DA VARIÁVEL DE ENTRADA	ALTO (5 - 8) BAIXO (1 - 4)
Causas prováveis		CTQ1	CTQ2	CTQ3	...			
x1	Causa Provável 1	5	4	3	=	$(5 \cdot 10 + 4 \cdot 9 + 3 \cdot 8) = 110$	ALTO	8
x2	Causa Provável 2	4	3	2	=	$(4 \cdot 10 + 3 \cdot 9 + 2 \cdot 8) = 83$	BAIXO	2
x3	Causa Provável 3	3	2	1	=	$(3 \cdot 10 + 2 \cdot 9 + 1 \cdot 8) = 56$	BAIXO	2
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.

Figura 13: Representação da aplicação da Matriz de Esforço e Impacto
Fonte: Elaborado pelo autor

- **Análise de Árvore de Falhas:** Segundo Cantarelli (2011), Análise de Árvore de Falhas (ou *Fault Tree Analysis* - FTA) é um método dedutivo analítico tipo *top-down* (de cima para baixo). A FTA inicia com eventos primários, tais como falhas de componentes, erros humanos e de eventos externos que são rastreados através de portas lógicas para um evento indesejado superior, como um acidente ou falha grave.

Conforme Cantarelli (2011), a FTA auxilia no mapeamento do processo gerador de uma falha, em um sistema, a partir de uma falha topo, bem como propicia a identificação de causas raiz de modo eficaz. Sendo assim, a ferramenta é aplicável a diversas situações tanto em um projeto quanto em sistemas em operação.

Para aplicação desta ferramenta é necessária uma abordagem de equipe, com designação de um líder. A equipe deve ser multifuncional, para que seja agregado o conhecimento de diversas áreas.

Para condução desta análise de modo adequado é necessário seguir três princípios. São eles:

- Investigar o processo, sistema ou peça que falhou;
- Completar a investigação com verificação em campo para visualização;
- Registrar circunstância da ocorrência de falha.

Segundo Cantarelli (2011), o uso da metodologia consiste basicamente nos seguintes passos:

1. Obter informações básicas da falha;

2. Descrever um resumo da declaração da falha contemplando as circunstâncias de falha;
3. Definir o “evento topo” (falha sob estudo);
4. Desenvolver a árvore de falhas, onde a equipe avalia sucessivas perguntas “Por quê”;
5. Definir um plano de investigação (escopo, responsável, prazo);
6. Analisar os resultados da investigação;
7. Documentar a indicação do principal mecanismo de falha;
8. Analisar criticamente as conclusões;
9. Planejar ações corretivas;
10. Implementar controles que perpetuem a melhoria.

Na estrutura do DEMAIC, a FTA pode ser utilizada nas fases de Análise, de Definição e de Medição. Na Figura 14 pode-se verificar a representação de uma análise utilizando a ferramenta Árvores de Falhas para o exemplo de evento de superaquecimento de motor.



Figura 14: Exemplo de construção de uma Árvore de Falha

Fonte: <<http://www.smar.com/brasil/artigostecnicos/artigo.asp?id=53>>. Acesso em: 13 jan. 2013

- **Box Plot** ou Diagrama de Caixa: Segundo Cantarelli (2011), esta ferramenta é uma maneira de representar graficamente os grupos de dados numéricos através de seus resumos de grupos de números. Um *Box Plot* pode também indicar, se for o caso, os dados considerados pontos fora da curva (ou fora do normal, *outliers*).

De acordo com Cantarelli (2011), esta ferramenta consiste na representação gráfica que permite comparar o comportamento de saída do processo (variável Y, contínua)

para diferentes níveis de uma potencial fonte de variação (variável X, discreta). O *Box Plot* funciona como se fosse uma “Vista do Topo” da distribuição, permitindo tanto avaliar a tendência central, quanto a dispersão da distribuição, conforme representado na Figura 15.

Para construir o *Box Plot*, é necessário executar os seguintes passos:

1. Colocar todos os dados em ordem crescente;
2. Indicar a mediana (ou, 2º Quartil);
3. A partir da mediana, contar 25% do total de valores acima dela, este último valor é o 3º Quartil. O mesmo deve ser feito para os valores abaixo da mediana, e este será o 1º Quartil;
4. Calcular a distância entre o 1º e o 3º Quartil e multiplicar este valor por 1,5;
5. O valor obtido na etapa 4 deve ser somado ao 3º Quartil e subtraído do 1º Quartil.

Qualquer valor que encontrar-se fora dos limites identificados na etapa 5 devem ser considerados como externalidade (*outliers*).

Segundo Cantarelli (2011), com o uso desta ferramenta é possível avaliar se há uma diferença grande de dispersão da variável Y em diferentes níveis da variável X. Caso uma grande diferença seja encontrada, é possível afirmar que existe alta probabilidade da fonte de variação X, ter influência sobre a dispersão da variável de resposta Y.

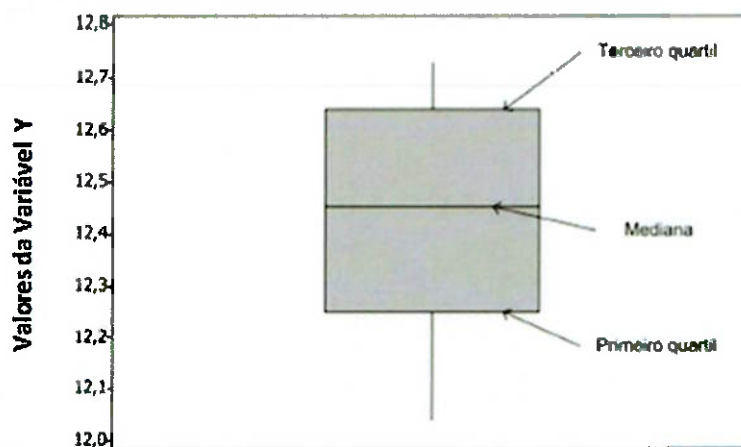


Figura 15: Representação de *Box Plot*

3. METODOLOGIA

Um grupo multidisciplinar foi formado para analisar as causas relacionadas à alta indisponibilidade do Forno de Pirólise SRT IV, o qual se baseou na metodologia DEMAIC e na utilização das ferramentas que a compõe conforme apresentado no item 2.

Primeiramente, foi identificada e definida uma métrica (ou indicador) que representasse claramente os efeitos causados pelas ações de manutenção e da operação, sendo que a temperatura de retorno na saída do TLE foi escolhida para tal representação e pode ser verificada na Figura 16 que a meta de 390 °C não era atingida na maioria dos casos.

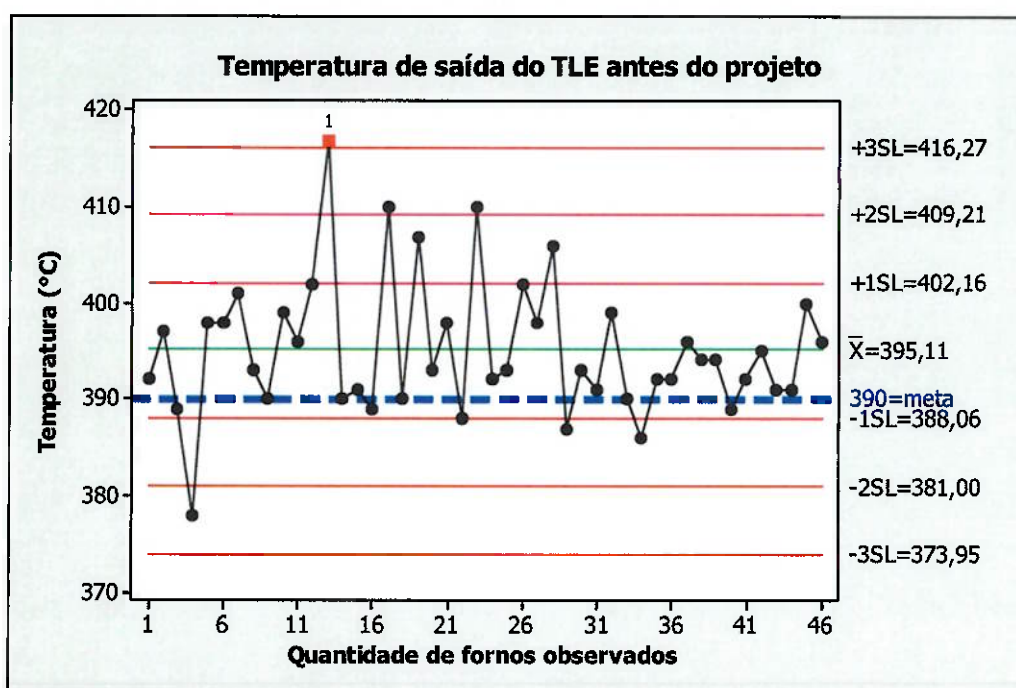


Figura 16: Temperatura de saída do TLE após manutenção em diversos fornos

Na busca de identificar e eliminar as possíveis causas que afetavam essa métrica, o grupo multidisciplinar seguiu o fluxo mostrado na Figura 17 e utilizou algumas ferramentas da metodologia Seis Sigma que serão detalhadas nos itens seguintes.

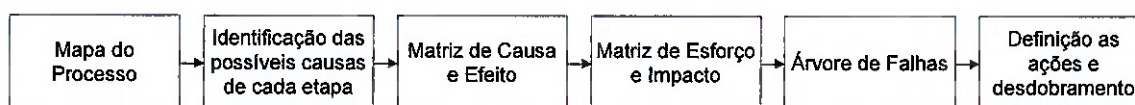


Figura 17: Fluxo e ferramentas utilizadas no desenvolvimento desse trabalho

3.1. ANÁLISE DOS DADOS

Baseado na ferramenta Mapa de Processo fez-se a representação gráfica dos procedimentos de manutenção e operação utilizados no Forno de Pirólise e seus periféricos, conforme mostrado na Figura 18. Os procedimentos são:

1. Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação;
2. Saída/Retirada do Forno de Pirólise de operação para Decoque¹²;
3. Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação após Decoque;
4. Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção;
5. Limpeza do TLE;
6. Limpeza da Zona de Convecção;
7. Manutenção/Reparo na Serpentina.

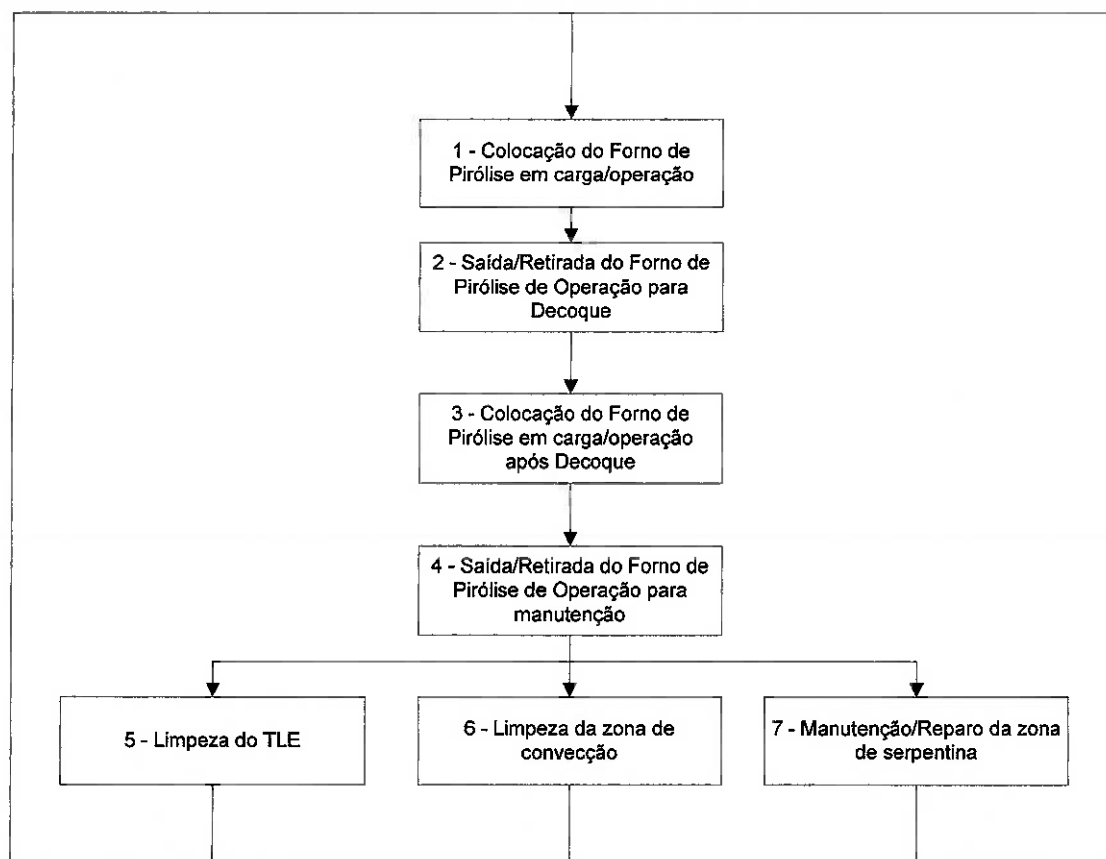


Figura 18: Mapa do Processo das etapas de operação e manutenção do Forno de Pirólise

¹² Decoque é o processo de regeneração da serpentina do forno por meio de injeção de ar para queimar o coque.

Para cada etapa constante nos procedimentos de manutenção e operação foram levantadas às principais causas e problemas potenciais que acontecem de acordo com a vivência e experiência do grupo multidisciplinar que avaliou e gerou a lista de causas potenciais, apresentada no APÊNDICE A.

Após organizar os itens semelhantes obteve-se um montante de 115 causas potenciais, as quais foram agrupadas em 2 grupos principais:

- Manutenção com 65 causas potenciais;
- Operação com 50 causas potenciais.

Devido à complexidade do processo e os periféricos de um Forno de Pirólise decidiu-se reorganizar as causas potenciais do grupo manutenção efetuando uma subdivisão em 3 escopos de trabalho menores, sendo que o primeiro escopo indicado pela letra "A" foi priorizado e será desenvolvido neste trabalho, conforme já citado no subitem 1.3 e apresentados novamente abaixo.

- A. Aumento da qualidade das intervenções de limpeza de TLE;
- B. Aumento da eficiência energética por limpeza da Zona de Convecção;
- C. Redução do tempo de manutenção em serpentinas.

Com a utilização da ferramenta Diagrama de Espinha de Peixe foram abordadas especificamente e de forma detalhada as causas potenciais associadas às tarefas envolvidas na limpeza do TLE, as quais foram alocadas nas categorias: Meio Ambiente, Material, Mão de Obra, Medição, Método e Máquina, conforme ilustrado na Figura 19.

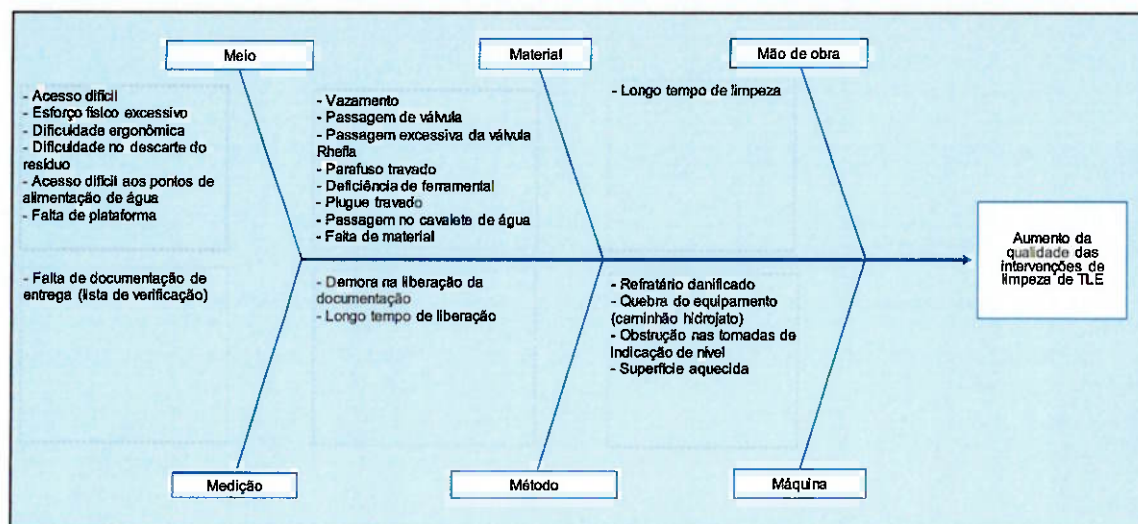


Figura 19: Diagrama de Espinha de Peixe da Limpeza do TLE

As causas potenciais também estão listadas abaixo:

- Vazamento;
- Acesso difícil;
- Demora na liberação da documentação;
- Passagem de válvula;
- Esforço físico excessivo;
- Dificuldade ergonômica;
- Passagem excessiva da válvula Rhefla®¹³;
- Longo tempo de liberação;
- Parafuso travado;
- Deficiência de ferramental;
- Plugue travado;
- Refratário danificado;
- Procedimento de limpeza inadequado;
- Dificuldade no descarte do resíduo;

¹³ Rhefla® é o tipo de válvula usada para isolar o Forno de Pirólise da linha de transferência quando o mesmo sair de operação.

- Acesso difícil aos pontos de alimentação de água;
- Quebra do equipamento (caminhão hidrojato);
- Longo tempo de limpeza;
- Passagem no cavalete de água;
- Obstrução nas tomadas de indicação de nível;
- Falta de material;
- Falta de plataforma;
- Superfície aquecida;
- Falta de documentação de entrega (lista de verificação).

A partir destas causas foi desenvolvida uma Matriz de Causa e Efeito que teve como finalidade avaliar a correlação entre a intensidade que cada causa potencial afeta o tempo indisponível do forno e temperatura do TLE após manutenção. Posteriormente, classificou-se o esforço de eliminação da causa potencial como alto e baixo de acordo a cada ação que se poderia realizar e que está apresentado na Figura 20.

10 - 9 - 8: Forte Correlação		7 - 6 - 5 - 4: Média Correlação			3 - 2 - 1: Baixa Correlação			0: Não há correlação		
Índice de Importância		10	9							
X's do Processo		Tempo indisponível de forno	Temperatura de retorno					TOTAL	Esforço de Eliminação da Variável de Entrada	Alto 5 - 8 Baixo 1 - 4
x1	Vazamento	6	4					96	baixo	3
x2	Acesso difícil	8	2					98	alto	8
x3	Demora na liberação da documentação	9	4					126	baixo	3
x4	Passagem de válvula	6	6					114	alto	5
x5	Esforço físico excessivo	8	6					134	alto	5
x6	Dificuldade ergonômica	6	4					96	alto	5
x7	Passagem excessiva da válvula Rhefla	8	8					152	alto	6
x8	Longo tempo de liberação	9	4					126	baixo	3
x9	Parafuso travado	8	2					98	alto	6
x10	Deficiência de ferramenta	9	8					162	baixo	1
x11	Plugue travado	8	4					116	baixo	2
x12	Refratário danificado	8	6					134	baixo	3
x13	Procedimento de limpeza inadequado	9	9					171	baixo	3
x14	Dificuldade no descarte do resíduo	4	4					76	baixo	1
x15	Acesso difícil aos pontos de alimentação de água	8	2					98	alto	6
x16	Quebra do equipamento (caminhão hidrojato)	8	9					161	baixo	2
x17	Longo tempo de limpeza	9	8					162	alto	6
x18	Passagem no cavalete de água	4	4					76	alto	6
x19	Obstrução nas tomadas de indicação de nível	6	8					132	baixo	3
x20	Falta de material	8	6					134	baixo	3
x21	Falta de plataforma	8	6					134	alto	8
x22	Superfície aquecida	6	4					96	baixo	2
x23	Falta de documentação de entrega (lista de verificação)	8	4					116	baixo	2

Figura 20: Matriz de Causa e Efeito das causas potenciais e seus respectivos índices de Esforço e Impacto avaliados pelo grupo

Os índices associados às classificações mencionadas estão de acordo com o que é usualmente utilizado pela empresa em projetos Seis Sigma e pode ser verificado na Figura 20.

A Matriz de Causa e Efeito foi complementada pela Matriz de Esforço e Impacto. Na Figura 21 é possível visualizar graficamente os resultados desta matriz, onde cada causa potencial encontra-se graficamente alocada em um dos quadrantes.

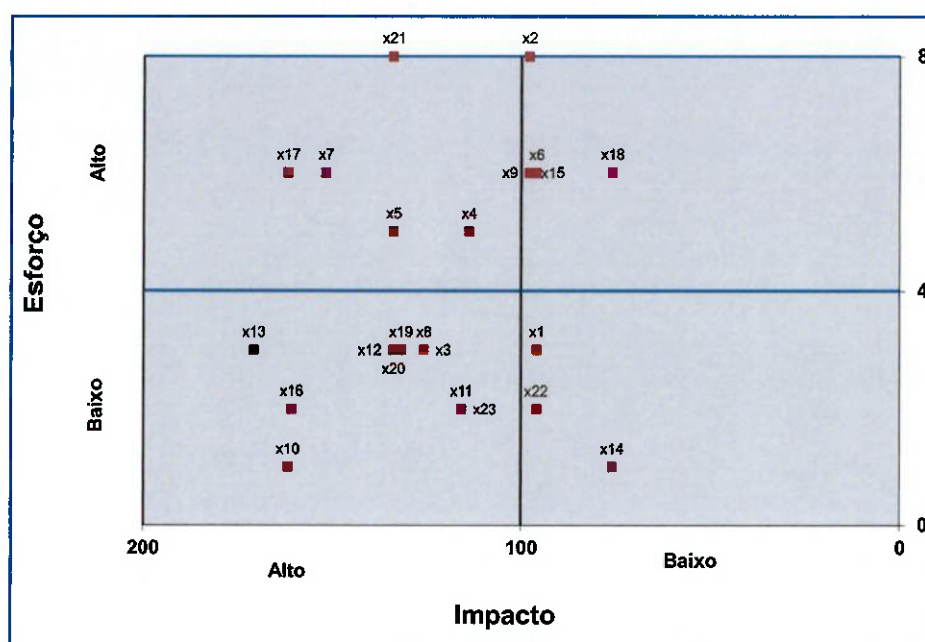


Figura 21: Representação gráfica da Matriz de Esforço e Impacto das causas potenciais

O foco principal do trabalho foi elaborar planos de ação para as causas potenciais alocadas no quadrante que representa baixo esforço e alto impacto.

Tabela 1 – Classificação das causas potenciais com baixo esforço e alto impacto

Esforço baixo alto impacto (ver e agir)	
x3	Demora na liberação da documentação
x8	Longo tempo de liberação
x10	Deficiência de ferramental
x11	Plugue travado
x12	Refratário danificado
x13	Procedimento de limpeza inadequado
x16	Quebra do equipamento (caminhão hidrojato)
x19	Obstrução nas tomadas de indicação de nível
x20	Falta de material
x23	Falta de documentação de entrega (lista de verificação)

Para todas as causas potenciais listadas na Tabela 1 foi desenvolvida separadamente uma Árvore de Falhas. A aplicação desta ferramenta teve como objetivo investigar detalhadamente as causas que levavam aos eventos de falha. Durante as reuniões de análise, eram feitas perguntas subsequentes e validações que permitiram ao grupo identificação das causas raiz e as falhas de sistema.

Esta avaliação foi realizada por um grupo com grande conhecimento nos procedimentos de manutenção em questão, possibilitando a proposição de planos de ação objetivos e eficazes para eliminação da causa raiz relacionada a cada causa potencial.

A fim de exemplificar o uso da ferramenta foram escolhidas para demonstrar neste trabalho as Árvore de Falha de duas causas potenciais dentre as listadas na Tabela 1.

A Figura 22 apresenta o desenvolvimento da Árvore de Falhas para a causa potencial “Refratário danificados”.



Figura 22: Árvore de Falhas para a causa “Refratário dos cones e saias danificados”

A Figura 23 apresenta o desenvolvimento da Árvore de Falhas para a causa potencial “Plugue travado”.

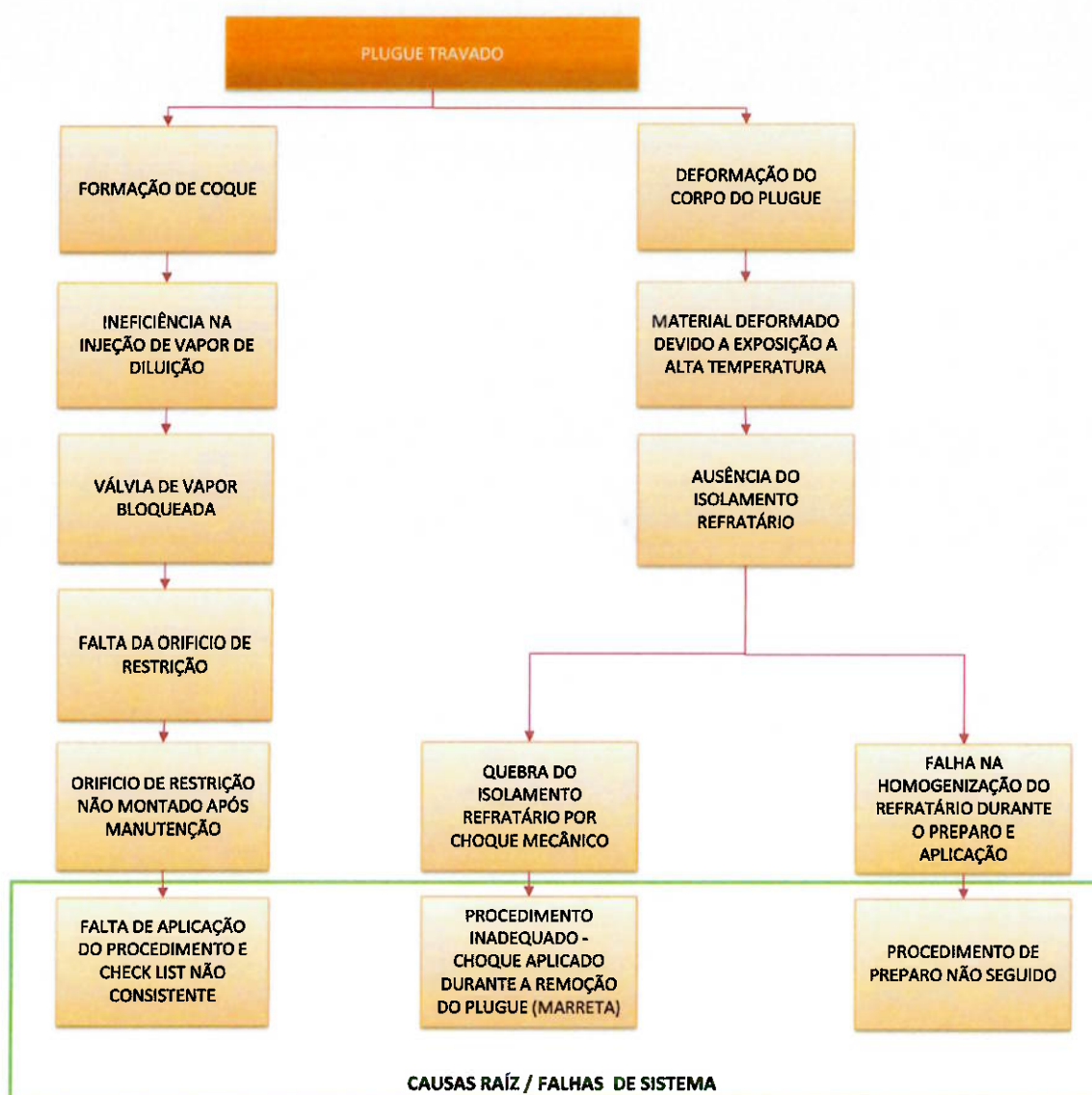


Figura 23: Árvore de Falhas para a causa "Plugue travado"

3.2. DESDOBRAMENTO DAS AÇÕES

A partir das causas raiz e falhas de sistema identificadas no item anterior foram propostos diversos planos de ação com o objetivo de eliminá-las e que são apresentados resumidamente na Tabela 2 relacionados com cada causa potencial, respectivamente.

Tabela 2 – Acompanhamento dos planos de ação relacionados às causas potenciais

CAUSA POTENCIAL	O QUE FAZER (ação ou contramedida)	QUEM (responsável)	QUANDO (prazo/conclusão)	PORQUE (justificativa da ação)	COMO (detalhamento da ação)	ONDE (local)	Acompanhamento				
							20%	40%	60%	80%	100%
Demora na liberação da documentação	Otimizar as etapas de elaboração das documentações	Manutenção / Produção	01/08/2012	Perda excessiva de hora-homem e tempo na elaboração das documentações e atraso dos trabalhos	Elaborar de check list padronizado	Fornos					
Longo tempo de liberação	Otimizar tempo de liberação do equipamento/sistema (Forno/TLE/Periféricos)	Produção / Recursos Humanos	Contínuo	Início dos trabalhos de manutenção prejudicados devido a atraso durante a liberação dos equipamentos	Dedicar Operador exclusivo na liberação do equipamento e documentação	Fornos					
Deficiência de ferramenta	Reduzir o tempo de preparação e movimentação do ferramenta do utilizado no Forno	Manutenção / Caldeiraria	01/12/2012	Perda de tempo de execução de manutenção por falta de ferramentas	Estabelecer jogo de ferramentas exclusivas para a manutenção do Forno acondicionadas em um posto avançado próximo ao equipamento	Fornos					
Plugue travado	Restabelecer sistema de injeção de vapor de diluição para evitar o acúmulo de coque na região do plugue	Manutenção / Caldeiraria	01/12/2012	Dificuldade na abertura dos plugues devido a formação de coque, sendo necessário a utilização de marreta e cunhas	Fabricar e instalar placa de escritório para restabelecimento da injeção de vapor de diluição na região do plugue	Fornos					
Refratário danificado	Garantir a aplicação correta de acordo com o fabricante	Manutenção / Complementar	01/12/2012	Redução na carga processada devido a aquecimento da estrutura metálica por queda do refratário	Aplicar o refratário juntamente com o acompanhamento do fabricante	Fornos					
Procedimento de limpeza inadequado	Estabelecer novos parâmetros de qualidade e tempos de limpeza de TLE	Manutenção / Complementar	01/12/2012	Qualidade do serviço executado comprometida gerando retrabalho e baixa campanha dos fornos por temperatura	Estabelecer novo padrão de qualidade determinando tempo de limpeza e inspeção com videocópia para validação	Fornos					
Quebra do equipamento (caminhão hidrojato)	Garantir a confiabilidade dos equipamentos	Manutenção / Complementar	01/12/2012	Necessidade de manter bomba de hidrojato sempre disponível, pois impacta nos prazos de manutenção	Executar check list preventivo dos equipamentos para antecipação da falhas	Fornos					
Obstrução nas tomadas de indicação de nível	Garantir a desobstrução destas tomadas de nível em todas as intervenções	Manutenção / Instrumentação	Contínuo	Se houver obstrução nas tomadas de nível ocorre o desame do Forno por nível baixo do vaso/balão ocasionando perda de produção	Garantir a execução desta atividade na rotina de intervenção do Forno	Fornos					
Falta de material	Adequar dos itens de estoque em ressuprimento automático	Manutenção / Caldeiraria	01/12/2012	Aumento no tempo da intervenção por falta de material, gerando aumento na indisponibilidade do equipamento	Adequar itens de estoque, criar lista técnica para os fornos, estabelecer padrão para ressuprimento automático	Fornos					
Falta de documentação de entrega (lista de verificação)	Garantir que a documentação esteja ao alcance dos executantes no momento da entrega do equipamento	Manutenção / Caldeiraria	01/12/2012	Atraso na entrega do equipamento por falta de documentação gerando indisponibilidade do equipamento	Estabelecer local em comum para toda a documentação do Forno (posto avançado dos Fornos)	Fornos					

Algumas ações demonstraram impacto fundamental na obtenção de melhoria nos resultados desse sistema e serão discutidas de forma mais detalhada nos itens subsequentes.

3.2.1. ALTERAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DO TLE

A limpeza dos tubos do TLE é uma tarefa manual, feita com uso de uma ferramenta de hidrojateamento¹⁴. Este procedimento de limpeza é efetuado após uma campanha de operação do equipamento.

Foi verificado ao longo do trabalho que a ponteira da ferramenta de execução do hidrojateamento não atingia toda superfície interna dos tubos, o que não proporcionava remoção total do coque formado ao longo da campanha.

As duas principais ações foram o projeto de um novo bico de hidrojateamento com maior diâmetro conforme Figura 24, e a padronização da velocidade de descida do bico de hidrojateamento nos tubos.

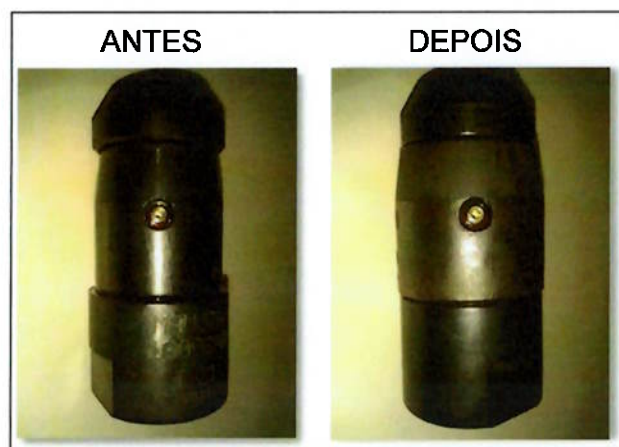


Figura 24: Mudança do projeto da ponteira da ferramenta de hidrojateamento

Essas modificações proporcionaram uma excelente melhora na remoção do coque. A imagem à esquerda da Figura 25 mostra como a parede interna do tubo do TLE ficava com o padrão de limpeza anterior ao projeto, ainda com muito coque depositado. Com a nova ponteira da ferramenta de hidrojateamento foi realizado um teste que apresentou melhor resultado conforme mostrado na imagem central da

¹⁴ Hidrojateamento é um procedimento de manutenção utilizado para remover o coque das superfícies dos equipamentos, o qual utiliza água em forma de jato e a alta pressão.

Figura 25. Como última etapa para promover a retirada de todo o coque do interior do tubo do TLE, a velocidade de descida da ferramenta de hidrojateamento foi controlada gerando um excelente resultado, onde pode se observar quase a totalidade da superfície do tubo de TLE na imagem à direita da Figura 25.



Figura 25: Progresso na limpeza da parede interna do tubo do TLE

3.2.2. REPOSIÇÃO DE REFRAATÁRIO EM COMPONENTES DO TLE

Conforme mencionado no item 1.2, dentre os componentes do TLE estão o cone, a saia e o plugue do “Y” que são revestidos por um material refratário. Este material quando danificado ou desgastado permite a formação de coque entre as rachaduras, perda de eficiência térmica devido à liberação de calor trocado com o ambiente, promove o entupimento dos tubos do TLE e o aumento de perda de carga nas serpentinas do Forno de Pirólise.

Foi verificado que o refratário existente na maioria dos cones e saias do TLE estava muito danificado e para correção dessa situação foi aplicado uma nova camada de refratário sob a supervisão do fornecedor, seguindo os procedimentos e ensaios estabelecidos de modo a garantir o sucesso da aplicação. Para os casos que o refratário apresentava poucas trincas foi efetuado o reparo pontual do mesmo.

Adicionalmente encontra-se em estudo um novo fornecedor de material refratário destinado ao uso no TLE de modo que seja garantida a mesma qualidade, porém com menor custo.

Na Figura 26 observa-se o cone do TLE e o suporte instalado no dentro do mesmo como preparativo para se efetuar a aplicação do refratário.



Figura 26: Cone do TLE e acompanhamento da aplicação do refratário ao cone

3.2.3. ELABORAÇÃO DE LISTA DE VERIFICAÇÃO PADRONIZADA

A empresa tem como premissa a segurança das pessoas, meio ambiente e equipamentos que se encontram dentro da sua unidade fabril e para que isso aconteça, as atividades executadas devem seguir diversos processos e padrões internos de segurança.

Analisando as atividades relacionadas à limpeza do TLE percebeu-se que os perigos envolvidos são sempre os mesmos. Para isso, um *check-list* (ou lista de verificação) padronizado foi elaborado com objetivo de reduzir o tempo de horas-homem gasto no processo de liberação do equipamento para a intervenção de manutenção.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra a lista de verificação (*check-list*) utilizada na liberação dos serviços de manutenção nos Fornos de Pirólise.

Como resultado dessa ação pode-se verificar que o tempo dispendido nas etapas de elaboração dos documentos de liberação do equipamento foi reduzido de 2.700 horas-homem para 450 horas-homem por ano.

Uma etapa muito importante na liberação do equipamento para as intervenções de manutenção é monitoração de explosividade do ambiente interno e dos arredores do mesmo para evitar que ocorra algum tipo de acidente, por exemplo, explosão.

Com o objetivo de reduzir o tempo de espera dos mantenedores para iniciar as atividades de reparo no equipamento, a equipe promoveu a alteração do horário de entrada de um Operador em uma hora, o qual fica exclusivo para realizar as

monitorações dos equipamentos que tiveram as suas atividades de manutenção planejadas, reduzindo assim, o tempo de liberação dos equipamentos em 50%.

3.2.5. MELHORIA NA ETAPA DE ENTREGA DO FORNO DE PIRÓLISE

Durante esse trabalho foi verificado que a etapa de entrega do Forno de Pirólise pós-manutenção era acompanhada somente pelo responsável da área de Produção o qual identificava alguma irregularidade no equipamento e solicitava o reparo.

Entretanto, a fase de entrega do equipamento à produção após uma intervenção de manutenção deve ser uma etapa assistida realizada por responsáveis designados da área de Manutenção e da área de Produção da empresa. Esta etapa de verificação segue os requisitos de um *check-list* (Figura 28) e é de fundamental importância, pois garante que o sistema não tenha que ser paralisado novamente atrasando a entrada dele em operação.

NÚCLEO DE MANUTENÇÃO				
FORNO []				
"CHECK LIST PARA ENTREGA DO FORNO APÓS MANUTENÇÃO"				
ÍTEM	DESCRIÇÃO	EMPRESA	RESPONSÁVEL	VISTO
CALDEIRARIA				
1	Bleed valve entre bloquinhos de ES está fechada e com flange terminal instalado.			
2	Figura 8 da LY e pote de decoque estão no posição aberta.			
3	Retirado raquetes da base da chaminé.			
4	Porcas de sustentação da serpentina dos fornos de NAFTA - SRT IV estão soltas.			
5	Travas do suporte de mola dos fornos de ETANO foram removidas.			
6	Dreno de AAC junto a convecção está com flange terminal instalado.			
7	Portinholas de observação estão fechadas.			
8	BV's do forno estão fechadas.			
9	Raquetes de FG foram removidas.			
10	Raquetes de NAFTA ou ETANO foram removidas.			
11	Raquetes de DS foram removidas.			
12	Retirar conexões de ar provisórias utilizadas na sopragem do forno para liberação do TLE.			
13	Retiradas as raquetes dos ramais Norte e Sul de US para abafamento.			
14	Poços dos pinos guias estão fechados.			
15	Foram retirados as raquetes do vapor de abafamento.			
16	Foram retiradas as raquetes das linhas de efluentes junto ao pote de decoque.			
17	Vent's de DS na base da chaminé estão capeados.			
18	Válvulas (FICV's) de NAFTA ou ETANO estão com drenos capeados.			
19	Válvula - UCV de AAC estão com flange terminal do dreno.			
20	Válvula - ROV de NAFTA / ETANO está com flange terminal no dreno.			
21	SV's do FA instaladas com disco de ruptura.			
22	Abafadores de ruído estão instalados.			
23	Área limpa.			
24	Todos os andalmes foram removidos			
Instrumentação				
25	Instalados termopares e proteção contra chuva nas saídas dos passes			
26	Instalados termopares do cross-over terceira plataforma			
27	Válvulas - HCV's gás dos 4 passes instaladas - piso			
28	Válvulas - FIC's NAFTA / ETANO dos 4 passes instaladas - piso			
29	FIC's VAPOR dos 4 passes instaladas - piso			
30	Válvulas - ROV de gás instalada - piso			

Figura 28: Check-list de entrega do equipamento pós-manutenção

Adicionalmente, o *check list* de entrega foi revisado e foram incluídos alguns itens que não eram verificados previamente antes da entrega do forno, como pode exemplo o item área limpa que é referente ao programa de organização física.

3.3. AVALIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante a fase de definição do projeto foi identificado que a variável operacional temperatura de saída do TLE no inicial de campanha dos Fornos de Pirólise, após retornar de manutenção, era indesejável e desdobrava-se para tempo de campanha reduzido, aumento do custo de manutenção e necessidade de retrabalho de manutenção diversas vezes ao ano.

Como discorrido anteriormente no item 3, é desejável que essa temperatura seja no máximo 390 °C na fase de partida (início de campanha) do Forno de Pirólise. Com o equipamento operando dessa forma é possível aumentar o tempo de campanha do TLE até que a temperatura limite de final de campanha seja atingida, ou seja, aproximadamente 500 °C.

Através da Figura 29 verifica-se que existe correlação negativa entre as variáveis, ou seja, quanto maior a temperatura de saída do TLE no início de campanha menor será o tempo de campanha desse equipamento e consequentemente do Forno.

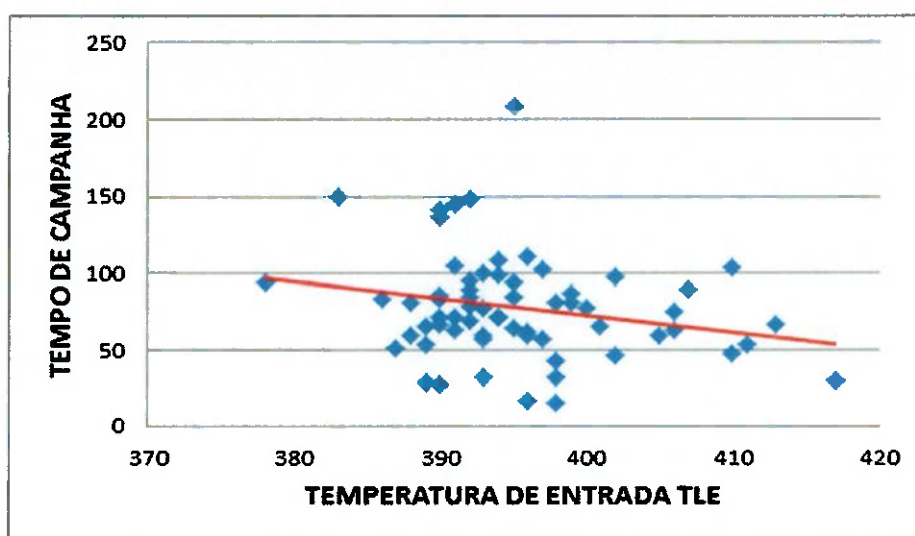


Figura 29: Gráfico de Correlação entre o tempo de campanha e a temperatura de início de campanha do TLE

As Figura 30 e Figura 31 geradas através da utilização do MINITAB®¹⁵ demonstram a curva de Gauss para os dados de temperatura de início de campanha do TLE coletados antes e depois do projeto, respectivamente.

Analisando as curvas e os índices de capacidade do processo (Cpk), verifica-se que antes e depois do projeto, com Cpk de -0,24 e 0,02, respectivamente, o processo ainda se mantém incapaz de atender à especificação do limite superior de temperatura de 390 °C na saída do TLE no início de campanha. Entretanto, ainda é possível afirmar que o número de intervenções de limpeza no TLE sem sucesso reduziu de 76% para 40%.

¹⁵ MINITAB® é um programa computacional de ferramentas estatísticas.

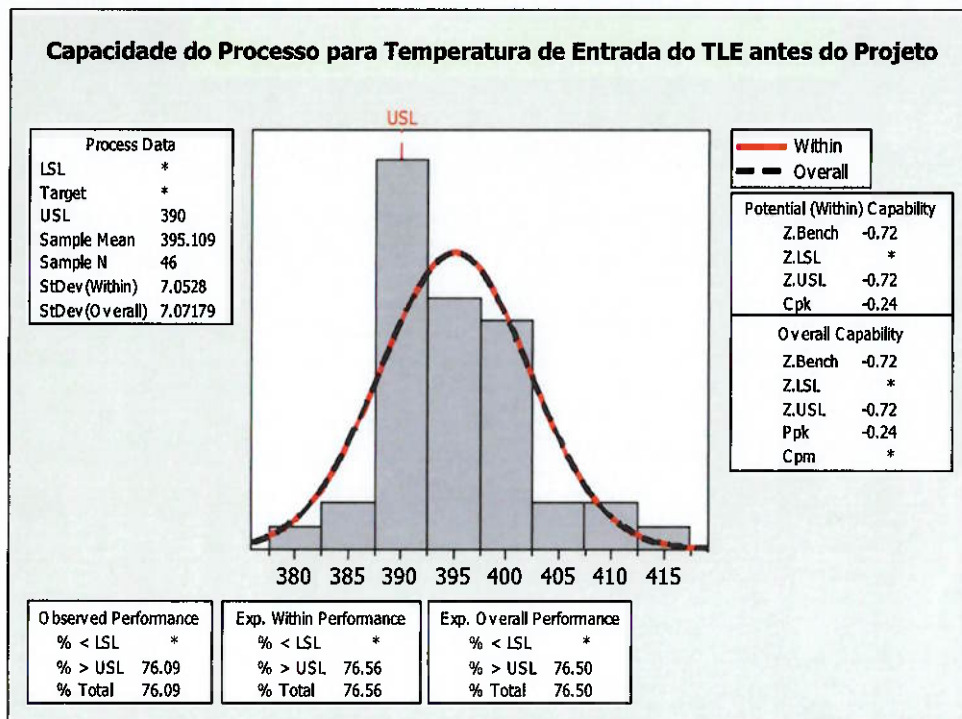


Figura 30: Capacidade do processo da temperatura de saída do TLE antes do projeto

A Figura 31 apresenta a análise da temperatura de saída do TLE após a aplicação do projeto.

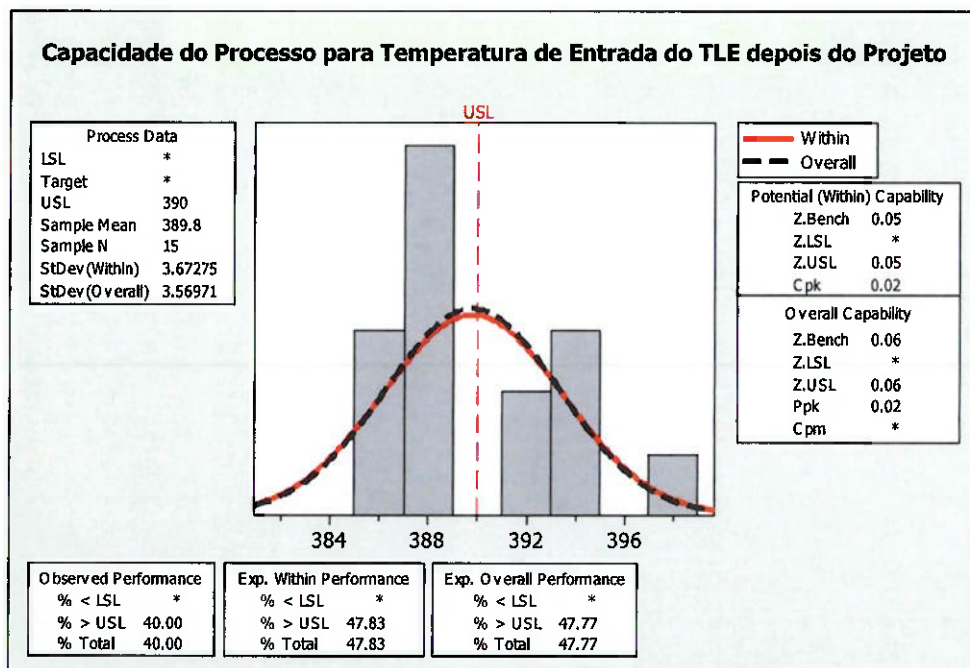


Figura 31: Capacidade do processo da temperatura de saída do TLE depois do projeto

Através da Figura 32 pode-se verificar que as ações realizadas no trabalho minimizaram as potenciais fontes de variação do processo de obtenção da temperatura de saída do TLE no início de campanha, onde a distribuição dos dados diminuiu significativamente assim como a mediana conforme pode ser verificado numericamente na Tabela 3.

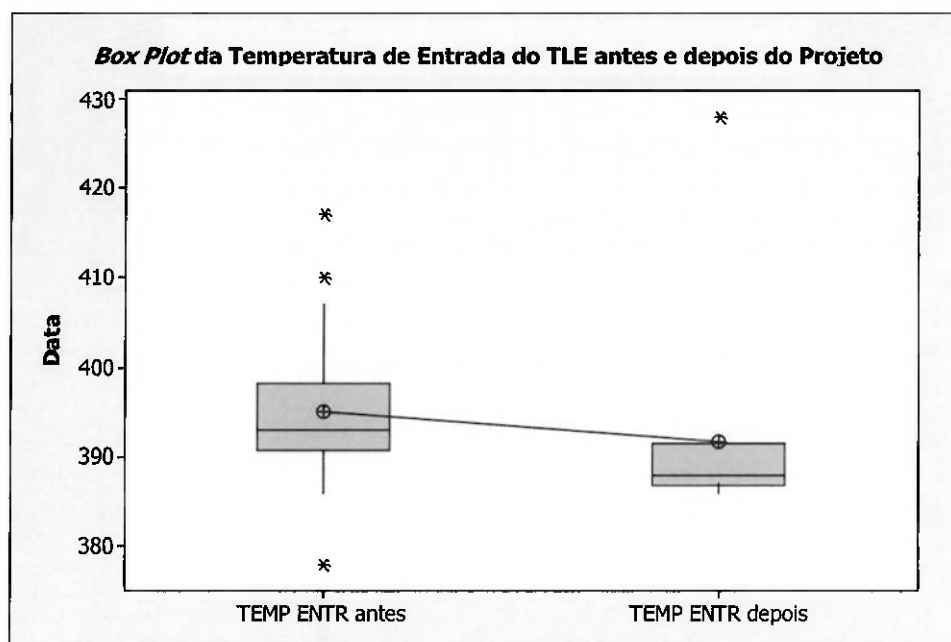


Figura 32: Box Plot da temperatura de entrada do TLE antes e depois do trabalho

A Tabela 3 apresenta a melhora nos dados de saída do TLE no início de campanha após a realização do projeto.

Tabela 3 – Evolução da temperatura de saída do TLE no início de campanha

Box Plot	Antes	Depois
1º Quartil	390,8	387,0
Mediana	393,0	388,0
3º Quartil	398,3	391,5
Range	7,5	4,5
Nº Dados	46,0	13,0

Através da utilização da ferramenta *Box Plot* demonstrada na Figura 33 chega-se a conclusão que as ações realizadas durante o desenvolvimento do trabalho foram eficazes, pois aumentaram a mediana do tempo de campanha dos Fornos de Pirólise de aproximadamente 75 dias para 89 dias.

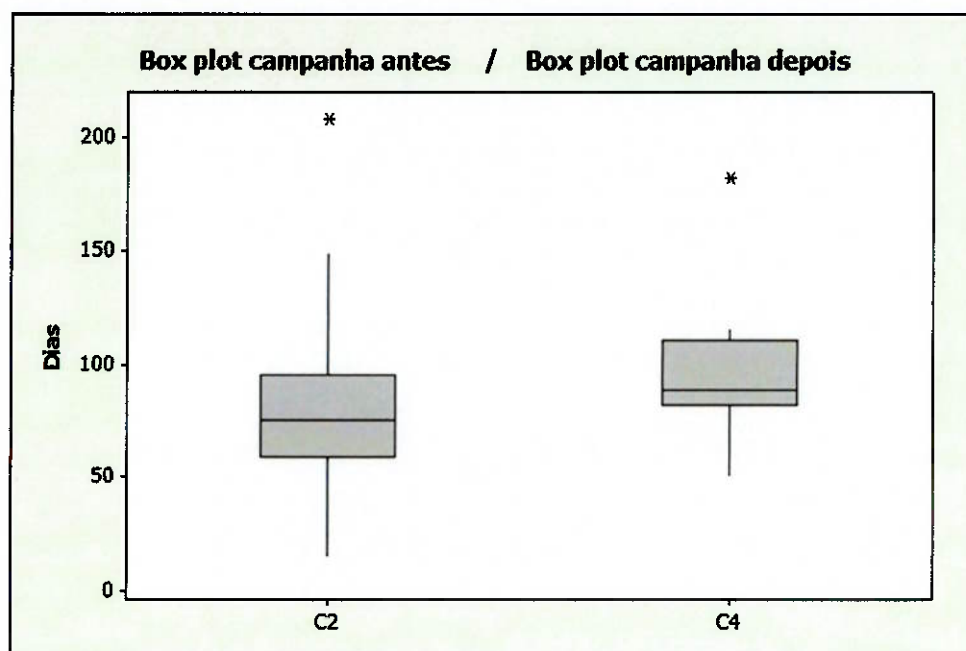


Figura 33: Box Plot do tempo de campanha dos fornos antes e depois do projeto

3.3.1. CONTROLE E MANUTENÇÃO DOS RESULTADOS

Como forma de controle e garantia dos resultados obtidos no desenvolvimento desse presente trabalho foi implantado um formulário (Figura 34) de controle de limpeza que possibilita a avaliação da empresa fornecedora do serviço de hidrojateamento e posteriormente a avaliação final do encarregado da Manutenção de forma a garantir a qualidade da limpeza do TLE.

Rua	Telefone:	E-mail:	CEP:
FORMULÁRIO PARA EXECUÇÃO DE SERVIÇO			
Data	13/10/12		
Cliente			
AVALIAÇÃO INICIAL			
Equipamento	Bomba de 20.000 PSI		
Condições do Equipamento/Local	Equipamento com muitos Tvers obturados e		
Placa do Veículo	CDZ561	Equipamento	Bomba de 20.000 PSI
Acessórios	Bico T40, T45 e Bico WMA, LK e Roto 1/2"		
Pistola	Pistola de 1/2", Pistola de 1/4"		
Bicos	Bicos T40, T45 e Bico WMA, LK e Roto		
EPIS	Capote, Pistola, Pistola, Pistola, Pistola de 1/4"		
AVALIAÇÃO FINAL			
Condições do Equipamento/Local	Apresenta Avaliação da manutenção		
OBSERVAÇÕES/SUGESTÕES			
EXECUTANTE		ENCARREGADO	

Figura 34: Formulário de controle de limpeza do TLE

Outra ação que garante a qualidade do processo de limpeza do TLE é a avaliação por videoscopia, conforme demonstrada na Figura 35. O procedimento de videoscopia consiste em avaliar as partes internas dos equipamentos que não permitem o acesso de uma pessoa. Sendo assim, utiliza-se um dispositivo flexível com uma câmera filmadora acoplada em sua extremidade permitindo visualizar a condição interna do equipamento.



Figura 35: Avaliação por videoscopia dos tubos do TLE após o hidrojateamento

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A empresa obteve parte de seu capital intelectual investido recuperado através dos resultados obtidos no desenvolvimento desse trabalho, pois além das ações realizadas para reduzir a indisponibilidade dos Fornos de Pirólise foram identificadas outras mais que necessitam de investimento de maior porte, como novos projetos.

Conclui-se, também, que a metodologia DEMAIC utilizada trouxe ganhos nos processos de manutenção e operação dos Fornos de Pirólise, sendo elas: a redução do tempo gasto de homem-hora na etapa de liberação da documentação e do equipamento para a manutenção e no seu retorno à operação, o aumento do tempo de campanha do conjunto Forno de Pirólise e seus periféricos (por exemplo, o TLE) e as consequentes redução no custo de manutenção do TLE devido às intervenções realizadas durante o ano e a perda de produção evitada.

Como avaliação futura da produtividade dos trabalhos de limpeza dos tubos do TLE pela técnica de hidrojateamento e a aderência na temperatura de início de campanha do Forno, sugere-se redesenhar a ponteira (bico) da ferramenta (pistola) de hidrojateamento para que a mesma promova um melhor processo de decapagem do coque impregnado internamente aos tubos, reduza o tempo de manutenção (limpeza) e aumente o tempo de campanha do Forno.

Como outro trabalho futuro, sugere-se a aplicação da massa refratária com o uso de ferramenta de homogeneização para gerar uma massa mais compacta e uniforme.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB LUMMUS GLOBAL. Manual de Operação da Unidade de Etileno: revisão 1. Santo André: 2008. 2 volumes.

ABNT. Rio de Janeiro. NBR ISO 9000. Disponível em: <<http://qualidadeuniso.files.wordpress.com/2012/09/nbr-iso-9000-2005.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2012.

ABNT. Rio de Janeiro. NBR ISO 9000. Disponível em: <<http://qualidadeuniso.files.wordpress.com/2012/09/nbr-iso-9004-2010.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2012.

BRASKEM. São Paulo. Unidade de Petroquímicos Básicos. Disponível em: <<http://www.braskem.com.br/catalogo2012/>>. Acesso em: 24 nov. 2012.

BRASKEM. MGMC – Manual de Gerenciamento da Manutenção e Confiabilidade: revisão 1. Bahia: 2009.

CANTARELLI, E. Treinamento Six Sigma Green Belt Operações. Santo André, SETA, 2011. As apostilas 1 e 2 foram ministradas durante o treinamento de Seis Sigma na empresa.

CARVALHO, M. M. de. et. al. **Gestão da Qualidade – Teoria e Casos**. 12. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

EBAH. São Paulo. NBR 5462. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAk3wAC/nbr5462>>. Acesso em: 25 nov. 2012.

EZZAT, A. A.. Passivation of ethylene cracker transfer line heat exchangers. **Digital Refining**, 2009. Disponível em: <<http://www.digitalrefining.com/article/>>. Acesso em: 10 jan. 2013.

KARDEC, A; NASCIF J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

KLEIN, M. C. A. **A História do Polo Petroquímico do Grande ABC e da APOLO**. 1. ed. São Paulo: Clube Editorial, 2011.

MULLENIX, S.; COLLIER, M.. TLE Failures and Troubleshooting. In: ETHYLENE PRODUCERS' CONFERENCES OF AICHE, volume 12., 2003, New Orleans – Louisiana. **Artigos.**

ROCHA, D. R. da. **Gestão da Produção e Operações**. 1. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

ROZACKY, R.. In-Placed Repair Technique for Transfer Line Exchanger. In: ETHYLENE PRODUCERS' CONFERENCES OF AICHE, volume 03., 1994, Atlanta – Georgia. **Artigos.**

SOUZA, C. M.; TEIXEIRA, F. L. C.. Crescimento da Produtividade, Competitividade e Reestruturação Produtiva na Petroquímica Brasileira. Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 38, n. 4, p. 622-636, 2007.

SOUZA, G. F. M. de; NETTO, A. C.. **Gestão de Processos**. São Paulo: USP, 2011. Notas de Aula da disciplina GOK-006 – Gestão de Processos.

WOERDE, H. M.; OOSTERKAMP, P. F. V. D.; ZIMMERMAN, G.; ZYCHLINSKI, W.; BRUN, C.; SPOSITO, L.. New Developments in Fouling Inhibition of Cracking Coils and TLE's. In: ETHYLENE PRODUCERS' CONFERENCES OF AICHE, volume 09., 2000, Atlanta – Georgia. **Artigos.**

APÊNDICE A – LISTA DE CAUSAS POTENCIAIS DE CADA ETAPA DOS PROCEDIMENTOS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO

Tabela 4 – Lista de causas potenciais para o procedimento 1.0 – Colocação do Forno de Pirólise em carga/operacão. Fonte: Arquivo da empresa

1.0 - Colocação do Forno de Pirólise em carga/operacão	
Etapas:	Causas potenciais:
1.1 - Alimentar gás combustível para os maçaricos;	Válvula travada; Válvula não rearma; Vazamento; Falta de alimentação de ar para a válvula; Sujeira na linha de ar para a válvula;
1.2 - Acender 8 maçaricos na base com 0,5 kgf/cm ² ;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetros sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
1.3 - Acompanhar a elevação de temperatura na taxa de 80 a 100 °C/h;	Falha na indicação de temperatura; Procedimento de elevação da temperatura não seguido/conhecido;
1.4 - Acender 1º piso intercalando maçaricos e acompanhar a elevação de temperatura até atingir 200 °C;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetros sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
1.5 - Alinhar vapor de diluição para forno e também água de caldeira para o vaso/balão para formação de nível e termosifão no TLE;	Vazamento; Válvula danificada; Falha na indicação de vazão de vapor de diluição; Falha na indicação de nível de campo e de painel do vaso/balão;
1.6 - Acender 2º piso intercalando maçaricos e acompanhar a elevação de temperatura até atingir 300 °C;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetros sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
1.7 - Acender 3º piso intercalando maçaricos e acompanhar a elevação de temperatura até atingir 500 °C;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetros sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;

Continua

Conclusão

Etapas:	Causas potenciais:
1.8 - Virar o forno para operar somente com vapor;	Pistão enroscado; Falha nas indicações de aberto e fechado;
1.9 - Montar canhão de prevenção nos potes de decoque;	Vazamento; Falta de material; Acesso difícil;
1.10 - Virar as válvulas Rheflas® e abrir para a linha de transferência, fechando para o pote;	Travamento da válvula Rhefla®; Quebra da bucha do atuador; Desarme do atuador; Quebra do atuador; Formação de coque;
1.11 - Virar a figura 8 e depois rearmar a válvula de Nafta, normalizando o alinhamento do cavalete;	Travamento da válvula selecionadora; Vazamento; Atuação inadequada na válvula de controle;
1.12 - Acender todos os maçaricos do 2º piso;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetros sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
1.13 - Aumentar a vazão de Nafta;	Falha na indicação de vazão; Pressão serpentina alta; Acesso para manutenção; Tomadas de medição de vazão obstruídas;
1.14 - Acender todos os maçaricos do 3º piso;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetros sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
1.15 - Fechar a purga para Utilidades do vaso/balão do 4º piso;	Vazamento; Válvula travada;
1.16 - Normalizar o cavalete de água de caldeira e ajustar todos os maçaricos do forno utilizando ar primário e secundário.	Vazamento; Válvula travada; Sistema de regulação de ar para maçarico travado; Passagem da válvula de água de caldeira;

Tabela 5 – Lista de causas potenciais para o procedimento 2.0 – Saída/Retirada do Forno de Pirólise de operação para Decoque. Fonte: Arquivo da empresa

2.0 - Saída/Retirada do Forno de Pirólise de operação para Decoque	
Etapas:	Causas potenciais:
2.1 - Bloquear alimentação de nafta;	Válvula travada; Passagem na válvula;
2.2 - Apagar maçaricos do 3º piso;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetro sem calibração; Damper enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
2.3 - Apagar maçaricos dos 1º e 2º pisos, apagando 2º piso total e intercalando o 1º piso;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetro sem calibração; Damper enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
2.4 - Alinhar vapor de média pressão para o sistema por 10 a 15 minutos;	Válvula travada; Passagem na válvula; Dificuldade de drenagem de condensado da serpentina;
2.5 - Bloquear vapor de média pressão e abrir a purga do vaso/balão para Utilidades;	Válvula travada; Passagem na válvula; Vazamento;
2.6 - Acompanhar temperatura no processo de decoqueamento;	Falha na indicação de temperatura; Procedimento de elevação da temperatura não seguido/conhecido; Falha na indicação de vazão de ar; Falha na indicação de vazão de vapor de diluição;
2.7 - Alinhar água para o pote de decoque;	Válvula travada; Vazamento; Acesso difícil;
2.8 - Bloquear os cromatógrafos de oxigênio;	Válvula travada; Acesso difícil;
2.9 - Virar o forno para pote de decoque;	Travamento da válvula Rhefla®, Quebra da bucha do atuador; Desarme do atuador; Quebra do atuador; Formação de coque; Falha na indicação de diferencial de pressão;

Continua

Conclusão

Etapas:	Causas potenciais:
2.10 - Após virada das válvulas, acionar o recuo do pistão de decoque;	Pistão enroscado; Falha nas indicações de aberto e fechado;
2.11 - Montar o dispositivo de decoque;	Falta de material; Dificuldade de engate do mangote;
2.12 - Alinhar ar para o interior do sistema;	Vazamento; Válvula travada; Falha na indicação de vazão de ar; Falha na indicações das chaves seletoras;
2.13 - Controlar as vazões de ar para a queima;	Falha na indicação de vazão de vapor;
2.14 - Regular os maçaricos para controle de queima;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetro sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
2.15 - Acompanhar a queimar do coque;	Falha na indicação de temperatura; Falha na indicação de vazão de ar; Falha na indicação de vazão de vapor de diluição;
2.16 - Aumentar gradativamente as pressões dos queimadores até promover a queima total do coque.	Falha na indicação de pressão;

Tabela 6 – Lista de causas potenciais para o procedimento 3.0 – Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação após Decoque. Fonte: Arquivo da empresa

3.0 - Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação após Decoque		
Etapas:	Causas potenciais:	
3.1 - Desconectar as mangueiras de ar e avançar o pistão de decoque;	Conexões das mangueiras danificadas; Vazamento;	
3.2 - Virar válvulas Rheflas®, sendo lado aberto para a LT e lado fechado para o pote;	Travamento da válvula Rhefla®; Quebra da bucha do atuador; Desarme do atuador; Quebra do atuador; Formação de coque; Falha na indicação de diferencial de pressão;	
3.3 - Iniciar alimentação de nafta;	Travamento da válvula selecionadora; Vazamento; Atuação inadequada na válvula de controle;	
3.4 - Acender maçaricos dos 1º, 2º e 3º pisos de acordo com as vazões de nafta, seguindo o procedimento 1.0 - Colocação de Forno de Pirólise em carga/operação;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetro sem calibração; Dampers entrecando; Ar primário e secundário sem calibração;	
3.5 - Fechar o sistema de purga para Utilidades do vaso/balão no 4º piso.	Válvula travada; Passagem na válvula; Vazamento;	

Tabela 7 – Lista de causas potenciais para o procedimento 4.0 – Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção. Fonte: Arquivo da empresa

4.0 - Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção	
Etapas:	Causas potenciais:
2.0 - Saída/Retirada do Forno de Pirólise de operação para Decoque	
4.1 - Apagar 4 maçaricos do 3º piso;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetro sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
4.2 - Bloquear o ar e abrir os mangotes;	Dificuldade para destravar os mangotes;
4.3 - Acionar o recuo do pistão de decock;	Falha de indicação de aberto e fechado; Falha na boteira de acionamento; Procedimento não seguido;
4.4 - Apagar o forno e acompanhar a queda gradativa da temperatura até 200 °C;	Falha no maçarico, como: Obstrução; Furo no flexível; Manômetro sem calibração; Dampers enroscando; Ar primário e secundário sem calibração;
4.5 - Bloquear a água e o vapor do vaso/balão;	Válvula travada;
4.6 - Abrir o sistema de purga para Utilidades do vaso/balão do 4º piso;	Passagem de válvula;
4.7 - Bloquear o gás combustível no limite de bateria;	Acesso difícil;
4.8 - Efetuar liberação criteriosamente do forno quando houver trabalhos na câmara de radiação ou convecção.	Dificuldade na virada da Figura 8 da válvula Rhefla®;

Tabela 8 – Lista de causas potenciais para o procedimento 5.0 - Limpeza do TLE. Fonte: Arquivo da empresa

5.0 - Limpeza do TLE		
Etapas:	Causas potenciais:	
4.0 - Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção		
5.1 - Raquetar o forno;	Passagem de válvula; Vazamento; Acesso difícil; Demora na liberação da documentação; Esforço físico excessivo; Dificuldade ergonômica; Falta de plataforma;	
5.2 - Preparar o sistema para a 1ª sopragem;	Acesso difícil; Longo tempo de liberação;	
5.3 - Cruzar os parafusos dos cones e soltar os plugues;	Parafuso travado; Deficiência de ferramental; Longo tempo de liberação; Plugue travado;	
5.4 - Efetuar a 2ª sopragem;	Acesso difícil; Longo tempo de liberação;	
5.5 - Abrir os cones para reparo no refratário;	Parafuso travado; Deficiência de ferramental; Longo tempo de liberação; Plugue travado; Refratário danificado;	
5.6 - Efetuar inspeção de abertura;	Longo tempo de liberação do serviço;	
5.7 - Efetuar a limpeza com equipamento de hidrojato no TLE;	Procedimento de limpeza inadequado; Longo tempo de liberação do serviço; Acesso difícil; Dificuldade no descarte do resíduo; Acesso difícil aos pontos de alimentação de água; Falta de material; Quebra do equipamento (caminhão hidrojato);	
5.8 - Efetuar a inspeção da limpeza;	Longo tempo de limpeza; Longo tempo de liberação de serviço;	

Continua

Conclusão

Etapas:	Causas potenciais:
5.9 - Encher o TLE para teste hidrostático;	Passagem no cavalete de água; Vazamento; Obstrução das tomadas de nível;
5.10 - Fechar os cones;	Parafuso travado; Longo tempo de liberação do serviço; Plugue travado;
5.11 - Montar os plugues;	Falta de material; Falta de ferramental;
5.12 - Remover as raquetes;	Passagem de válvula; Vazamentos; Acesso difícil; Longo tempo de liberação do serviço;
5.13 - Aliviar lateral da válvula Rhefla® para virada do forno;	Passagem excessiva da válvula Rhefla®; Falta de ferramental; Dificuldade ergonômica;
5.14 - Abrir fundo da válvula Rhefla® para limpeza;	Passagem excessiva da válvula Rhefla®; Falta de plataforma; Superfície aquecida;
5.15 - Hidrojatear fundo da válvula Rhefla®;	Passagem excessiva da válvula Rhefla®; Falta de plataforma; Superfície aquecida;
5.16 - Entregar forno a Operação	Falta de documentação de entrega (lista de verificação);
1.0 - Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação	

Tabela 9 – Lista de causas potenciais para o procedimento 6.0 - Limpeza da Zona de Convecção. Fonte: Arquivo da empresa

6.0 - Limpeza da Zona de Convecção	
Etapas:	Causas potenciais:
4.0 - Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção	
6.1 - Montar andaimes na convecção;	Longo tempo de liberação do serviço; Dificuldade na movimentação do material; Falta de prática de montagem;
6.2 - Abrir as tampas laterais e frontais;	Acesso Difícil; Parafuso travado; Parafuso quebrado; Dificuldade de movimentação da chapa;
6.3 - Alinhar vapor de média pressão a jusante da válvula de Nafta do forno;	Passagem de válvula; Vazamento; Dificuldade de drenagem de condensado;
6.4 - Cortar as linhas de nafta na redução da entrada da convecção;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução das linhas de 1 1/2"; Obstrução do pontos de purga do sistema; Acesso difícil; Falta de pontos de energia; Falta de prática na atividade do caldeireiro;
6.5 - Após abertura das tampas, remover todos os plugs e bengalas;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução da Zona de Convecção; Acesso difícil; Falta de pontos de energia; Falta de prática na atividade do caldeireiro;
6.6 - Hidrojatear todas as linhas de 1 1/2";	Longo tempo de liberação de serviço; Acesso difícil; Longo tempo para transporte de material para a plataforma; Falta de prática na atividade; Falta de pontos de energia elétrica; Falta de ferramental; Falta de ponto de água;
6.7 - Hidrojatear todos os tubos de cada passe;	Longo tempo de liberação de serviço; Acesso difícil; Longo tempo para transporte de material para a plataforma; Falta de prática na atividade; Falta de pontos de energia elétrica; Falta de ferramental; Falta de ponto de água;

Continua

Continuação

Etapas:	Causas potenciais:
6.8 - Realizar videoscopia de todas as linhas de 1 ½" e todos os tubos da convecção de todos os passes;	Longo tempo para limpeza do tubo; Longo tempo de liberação do serviço; Falta de ponto de energia; Acesso difícil; Limitação do aparelho; Falta de prática na atividade; Dificuldade na drenagem da curva;
6.9 - Iniciar sopragem de todos os passes com vapor de média pressão e a linha de 1 ½" aberta na curva superior, abrindo 100% da válvula de controle;	Passagem e válvula; Vazamento; Dificuldade de drenagem de condensado da linha;
6.10 - Fechar todas as linhas de 1 ½", inclusive a entrada da convecção de cada passe;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução da Zona de Convecção; Acesso difícil; Falta de ponto de energia; Falta de prática na atividade;
6.11 - Soprar todos os passes com vapor de média pressão, abrindo 100% da válvula de controle;	Passagem e válvula; Vazamento; Dificuldade de drenagem de condensado da linha;
6.12 - Fechar os plugs dos 1º e 2º tubos superiores de cada passe;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução da Zona de Convecção; Acesso difícil; Falta de ponto de energia; Falta de prática na atividade;
6.13 - Soprar todos os passes com vapor de média pressão, abrindo 100% da válvula de controle;	Passagem e válvula; Vazamento; Dificuldade de drenagem de condensado da linha;
6.14 - Fechar os plugs do 3º e 4º tubos inferiores de cada passe;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução da Zona de Convecção; Acesso difícil; Falta de ponto de energia; Falta de prática na atividade;
6.15 - Soprar todos os passes com vapor de média pressão, abrindo 100% da válvula de controle;	Passagem e válvula; Vazamento; Dificuldade de drenagem de condensado da linha;
6.16 - Soldar as "bolachas" e realizar teste hidrostático de todos os passes;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução da Zona de Convecção; Acesso difícil; Falta de ponto de energia; Falta de prática na atividade;
Continua	

Conclusão

Etapas:	Causas potenciais:
6.17 - Remover as "bolachas" e fechar bengalas;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Obstrução da Zona de Convecção; Acesso difícil; Falta de ponto de energia; Falta de prática na atividade;
6.18 - Soprar todos os passes com vapor de média pressão acompanhando a indicação de vazão;	Passagem e válvula; Vazamento; Dificuldade de drenagem de condensado da linha;
6.19 - Recompôr o isolamento do sistema;	Longo tempo de liberação do serviço; Falta de material; Difícil acesso; Falta de material de ancoragem;
6.20 - Fechar as tampas da convecção;	Acesso difícil; Parafuso travado; Parafuso quebrado; Dificuldade de movimentação das chapas;
6.21 - Remover os andaimes;	Longo tempo de liberação do serviço; Dificuldade na movimentação de material; Falta de prática na atividade;
6.22 - Remover as raquetes.	Passagem de válvula; Vazamento; Válvula travada; Acesso difícil; Longo tempo na liberação do serviço;
1.0 - Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação	

Tabela 10 – Lista de causas potenciais para o procedimento 7.0 - Manutenção/Reparo na Serpentina. Fonte: Arquivo da empresa

7.0 - Manutenção/Reparo na Serpentina	
Etapas:	Causas potenciais:
4.0 - Saída/Retirada do Forno de Pirólise para manutenção	
7.1 - Montar andaime nas bocas de visitas inferiores;	Longo tempo de liberação do serviço;
7.2 - Remover isolamento das bocas de visitas;	Longo tempo de liberação do serviço;
7.3 - Montar andaime no interno da radiação;	Longo tempo de liberação do serviço; Acesso difícil; Falta de iluminação; Falta de treinamento;
7.4 - Efetuar inspeção na serpentina e definir reparo;	Longo tempo de liberação do serviço; Acesso difícil; Falta de iluminação; Falta de treinamento; Falta de definição adequada do reparo;
7.5 - Efetuar reparos definidos pela inspeção;	Longo tempo na liberação do serviço devido explosividade; Acesso difícil; Falta de pontos de energia; Falta de prática na atividade; Falta de material; Procedimento de soldagem inadequado; Material inadequado;
7.6 - Efetuar inspeção após reparo;	Longo tempo de liberação do serviço; Acesso difícil; Falta de iluminação;
7.7 - Remover andaime interno da radiação;	Longo tempo de liberação do serviço; Acesso difícil; Falta de iluminação; Falta de treinamento;
7.8 - Refazer isolamento das bocas de visitas inferiores;	Longo tempo de liberação do serviço;
Continua	

Conclusão

Etapas:	Causas potenciais:
7.9 - Remover andaime das bocas de visitas.	Longo tempo de liberação do serviço;
1.0 - Colocação do Forno de Pirólise em carga/operação	