



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



EVENTO
ON-LINE

02 a 04
de dezembro 2020

Análise de Indicadores De Produção em Uma Mina Subterrânea

Alisson Brasil
UFMG/CPGEM

Renan Collantes Candia
UFMG/DEMIN

Resumo: A mineração vem gerando na economia brasileira uma média de 3,1 % no Produto Interno Bruto (PIB) durante o período 2013 a 2018, porém em recessões e cenários cada vez mais competitivos, torna-se essencial analisar gargalos operacionais para aumento da cadeia do fluxo de valor interno, como fator importante à sobrevivência e longevidade das operações. Para todos os processos industriais os indicadores de desempenho constituem uma espécie de bússola, para buscar melhor direcionamento, posicionamento e realinhamento às metas estratégicas corporativas. O artigo pretende disseminar as avaliações de indicadores para todas as indústrias independente do ramo, segregando por área, indicando os principais potenciais por interrupções em paradas produtivas do processo de uma mina subterrânea.

Palavras-chave: Mina Subterrânea, Gestão de Processos, Melhoria Continua, Indicador de Performance

Analysis of Production Indicators in an Underground Mine

Abstract: Mining has been generating in the Brazilian economy an average of 3.1% in the Gross Domestic Product (GDP) during the period 2013 to 2018, however in recessions and increasingly competitive scenarios, it has become it is essential to analyze operational bottlenecks to increase the internal value flow chain, as an important factor for the survival and longevity of operations. For all industrial processes, performance indicators are a kind of compass, to seek better direction, positioning and realignment to corporate strategic goals. The article intends to disseminate the evaluations of indicators to all industries regardless of the branch, segregating by area, indicating the main potentials for interruptions in production stops in the process of an underground mine.

Keywords: Underground Mine, Processes management, Continuous improvement, Performance Indicators

1. Introdução

Nenhum processo é permanentemente adequado ou correto indefinidamente, e a mineração ao longo da história vem se reinventando com novos métodos e processos, a fim de contribuir para a evolução da humanidade em relação aos recursos minerais (CURI, 2017, p.26). Na era moderna após a segunda guerra mundial, as indústrias principalmente as do Japão, tiveram que buscar soluções para reconstrução do país, com pouco recurso disponível. Uma das empresas que conseguiram trazer soluções, reduzindo perdas, falhas e desperdícios foi a Toyota Motors (WERKEMA, 2012, p.28) injetando um pensamento enxuto ao redor do mundo nas indústrias manufatureiras e nos setores primários, inclusive o extrativista.

O principal ponto para a escolha de um trabalho de melhoria continua, consiste na escolha de situações que merecem tratativas e que são até então, são desconhecidas ou pouco elucidadas em âmbito operacional. A melhoria persistirá em analisar qualitativamente e quantitativamente as oportunidades/gargalos, procurando soluções ágeis, baixo esforço e alto impacto no que se refere aos resultados. No estudo, os problemas são verificados sob o olhar de dois grandes indicadores de performance de desempenho (KPI): produção (t) e custos (R\$). O termo KPI vem do inglês *Key Performance Indicator* (indicador chave de desempenho). Estes indicadores são utilizados para medir o desempenho das atividades processos e sistemas, permitindo o acompanhamento sistemático de metas estabelecidas (FRANCISCHINI, 2017, p.31).

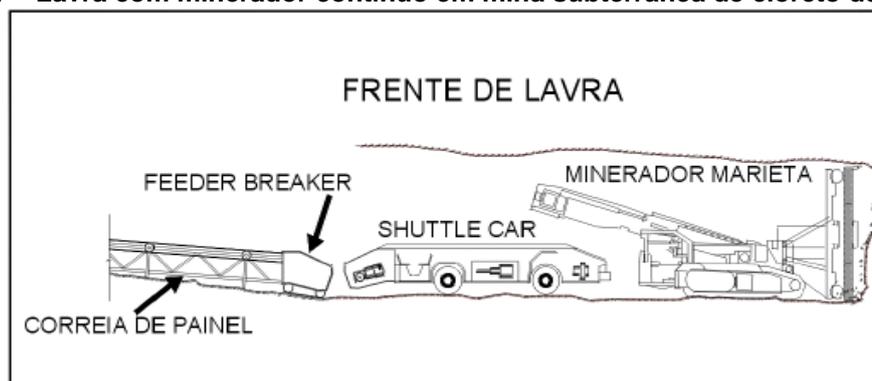
A maior vantagem do uso de *KPI's* é transformar números avulsos em conhecimento sobre o negócio. Com esses dados, se conseguem fazer previsões e identificar problemas no andamento das atividades, possibilitando fazer ajustes na estratégia caso seja necessário. Em outras palavras, os *KPI's* oferecem um diagnóstico preciso da organização, o que torna os erros no planejamento cada vez menos frequentes.

O artigo pretende demonstrar através dos indicadores, quais áreas ou setores, dentro de uma mina subterrânea tiveram maior impacto no processo produtivo e propor e escalonar ações que sejam importantes para aumento da produtividade e ao mesmo tempo na qualidade das operações.

2. Estudo De Caso

A área industrial de estudo é uma mineradora subterrânea, situada na região centro-leste do estado de Sergipe, no município de Rosário do Catete, distando 45 km da capital Aracaju, sendo sua operação realizada por lavra subterrânea e método de extração por câmaras e pilares (*room and pillar*). O ciclo operacional, tanto para estéril quanto para o minério, é composto por: desmonte mecânico por minerador contínuo, carregamento e transporte por *shuttle car*, fragmentador primário tipo *feeder brake*, transporte por correia transportadora e içamento de material por sistema de poço, ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Lavra com minerador contínuo em mina subterrânea de cloreto de potássio.



Fonte: VALE FERTILIZANTES (2012)

O produto para venda é o cloreto de potássio (KCl), sendo produzidas basicamente três tipos de produtos após a lavra e beneficiamento (granulado, *standard*, *pink*). As características químicas do produto (K₂O) há de serem sempre superiores a 58 % para recuperação e venda.

3. Identificação do Problema

Nos últimos cinco anos durante o período de (2015 a 2019) foram desmontadas/lavradas cerca de 11.023.561 t, sendo o planejado de 10.710.000 t, estes valores representam +2,93 % durante o período. Porém nota-se que em 2019, a produção da mina teve uma redução de -13,49 % em relação a quantidade de produção orçada, o que traz a necessidade do entendimento das reais e principais perdas.

Tendo como base o indicador de produção/massa desmontada na mina (t), será analisado a performance da produção nos meses de janeiro a dezembro de 2019, para verificação de quais indicadores tiveram maior impacto na lavra, conforme descrição da Tabela 1.

Tabela 1 – Produção de material desmontado em 2019 (t)
Produção 2019 (t)

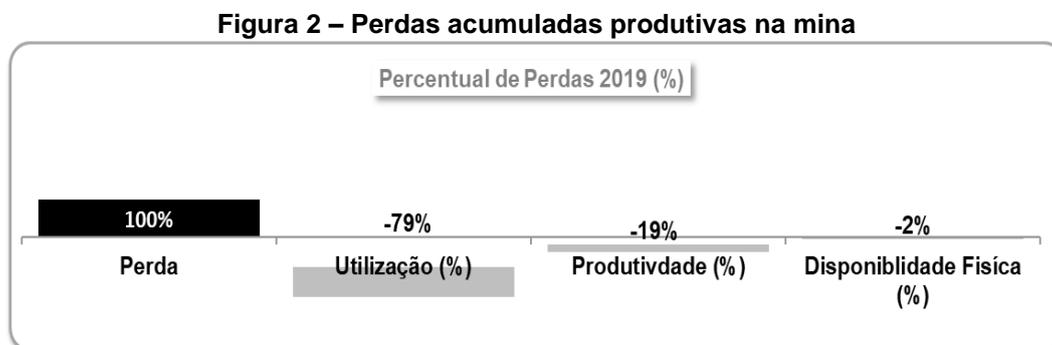
Painel	Unid	Realizado	Planejado	Varição
1	t	302.963	401.679	-98.716
2	t	317.213	408.882	-91.669
3	t	240.442	280.783	-40.341
4	t	218.844	229.403	-10.559
5	t	191.844	195.801	-3.957
6	t	311.026	333.770	-22.744
7	t	35.855	32.841	3.014
8	t	17.585	22.709	-5.124
9	t	13.177	21.491	-8.314
10	t	86.911	74.375	12.536
11	t	184.796	174.754	10.042
Total	t	1.920.656	2.176.488	-255.832
Indicadores de Performance				
Utilização	%	26,4	31,5	-5,1
Disp. Física	%	72,7	73,0	-0,3
Produt.	t/h	167,4	174,2	-6,8
O.E.E	%	18,5	23,0	-4,5

Fonte: Contribuição do autor (2020)

Baseando-se na Tabela 1, serão consideradas algumas análises, com os equipamentos de lavra contínuos, para a análise da produção no ano de 2019:

- ✓ Utilização Média: Realizada x planejada: 26,4 % x 31,5 %, representando diferença de - 5,1 %.
- ✓ Disponibilidade Física Média dos Equipamentos de Lavra: Realizada x planejada: 72,7 % x 73,0 %, representando diferença de -0,3 %.
- ✓ Produtividade Média: Realizada x planejada: 167,4 t x 174,2 t planejado, representando uma diferença de -3,9 %.
- ✓ O.E.E (eficiência geral de equipamentos): Realizada x planejada: 18,5 % x 23,0 %, representando uma diferença de -19,6 %.
- ✓ Produção: Realizada x planejada 1.920.656 t x 2.176.488 t, representando uma diferença de - 12,0 %.

Em 2019 as perdas produtivas (t) foram de -255.832 t de material desmontado na mina, em que representando as perdas por indicadores (utilização, produtividade e disponibilidade física), verifica-se que os maiores desvios foram: utilização (79 %), produtividade (19 %) e disponibilidade física (2 %), demonstrado na Figura 2.



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

O O.E.E (%) (*Overall Equipment Effectiveness*) significa eficiência geral do processo, sendo um KPI para medir a eficiência global de um processo/equipamento. A O.E.E (%) é representada pela equação 2, na qual traduz a real eficiência combinada da utilização (%), disponibilidade física (%) e produtividade (%).

$$O.E.E (\%) = (D.F) * (Produção) * (Util) \quad (2)$$

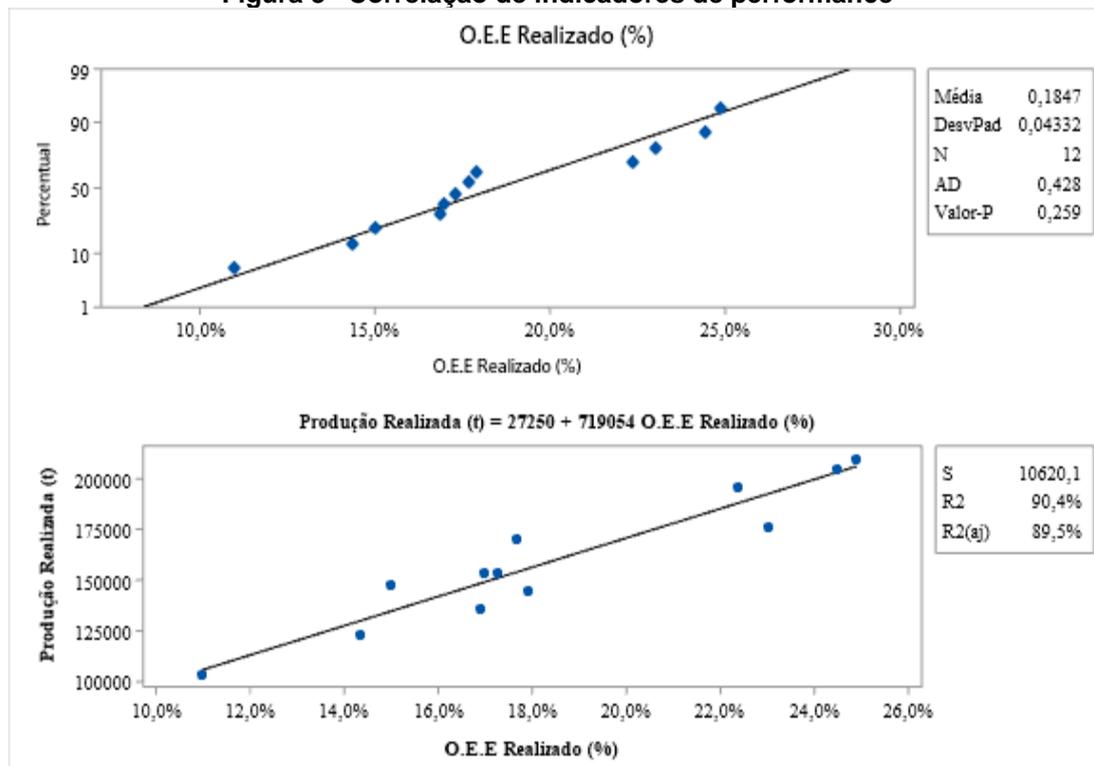
Sendo:

- ✓ Util. % (Utilização)= Tempo em que o equipamento esteve disponível e foi utilizado.
- ✓ D.F % (Disponibilidade Física) = Tempo útil de trabalho representa a diferença entre o tempo total disponível de trabalho do equipamento e o tempo de paradas programadas pela produção

✓ **Produt % (Produtividade)**= Relação direta entre a quantidade produzida de determinado produto e/ou serviço, dividida por algum recurso necessário (por exemplo tempo) para sua confecção/processo.

O **O.E.E %** é o indicador de maior utilização para a operação de mina e servirá para englobar as diversas áreas. Desta forma foi verificado se o KPI é correlacionado com a produção (t) da mina a título de comprovação, evidenciado pela Figura 3.

Figura 3 –Correlação de indicadores de performance



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Para verificar se há correlação deve-se buscar o coeficiente de correlação (R^2) que mede a descrição da proporção da variação y, que pode ser explicado pelas variações em x. Quando mais próximo o R^2 de um (1), o coeficiente de determinação será o grau de explicação da variação y em torno da varável x.

Para determinar se os dados não seguem uma distribuição normal, deve-se comparar o valor de p com o nível de significância. Um nível de significância de 0,05 indica um risco de 5% de concluir que os dados não seguem a distribuição normal quando eles realmente a seguem. Pelos dados analisados p é 0,259, que é maior do que o nível de significância de 0,05, o que rejeita a hipótese nula. Não é possível concluir que os dados não seguem uma distribuição normal

Tendo a informação da Figura 3.9, será verificado se a produção (t) em função do indicador (O.E.E), podem ser correlacionados como hipótese de função linear. Baseando-se na equação $Y=Ax + B$, foi assumido que a equação 3 pode ser assumida a seguinte função linear da produção (t) em função do indicador O.E.E (%):

$$\text{Produção (t)} = 27250 + 719054 \times (\text{O. E. E})\% \quad (3)$$

Após analisar que o principal KPI que esteve com maior percentual atrelado as perdas foi a utilização (79 %), será analisado através do gráfico de Pareto em 2019, as principais causas/problemas que estiveram correlacionados com a utilização, conforme Tabela 2.

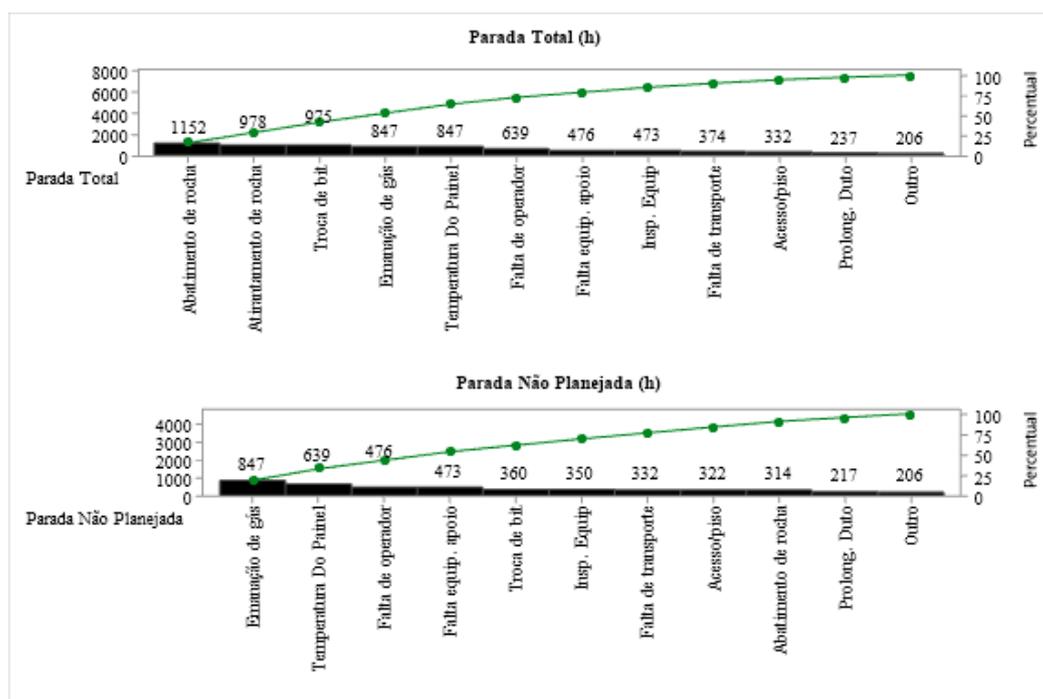
Tabela 2 – Paradas planejadas e não planejadas relacionadas ao fator da utilização.

Área	Causa	Horas		
		Paradas Não Planejadas (h)	Paradas Planejadas (h)	Total
Geomecânica	Atirantamento de rocha	314	838	1.152
Geomecânica	Abatimento de rocha	206	772	978
Produção	Troca de bit's	360	605	965
Geologia	Emanação de gás	847	0	847
Ventilação	Aumento de temperatura do painel	639	0	639
Produção	Falta de operador	476	0	476
Manutenção	Falta equipamento de apoio	473	0	473
Produção	Inspeção de equipamento	350	24	374
Produção	Falta de caminhonete	332	0	332
Geomecânica	Piso irregular	322	0	322
Ventilação	Prolongamento de Duto	217	19	236
Total		4.536	2.258	6.794

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Com base na Tabela 3.4 serão divididos quantitativamente as causas de horas paradas, por paradas não planejadas e não planejadas por causas conforme Figura 4.

Figura 4 –Correlação de indicadores de performance



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

4. Análise Dos Dados

Baseando-se nas principais paradas de lavra, foi proposta uma matriz de priorização, buscando-se realizar a correlação entre as soluções propostas por critérios de escala. Para essa matriz serão utilizados os seguintes critérios: produtividade (t/h), facilidade, rapidez, impacto sobre a causa raiz, conforme esquematizada na Tabela 4.

Tabela 4 –Matriz de priorização de problemas

Causas	Prod. (t/h)	Facilidade	Rapidez	Impacto Positivo Sobre a Causa	Total	Total
	7	8	9	10		
Abatimento de Choco	3	1	3	3	86	7°
Atirantamento de Choco	3	3	3	3	102	3°
Deslocamento Entre Painéis	5	1	3	3	100	4°
Emanação de gás	5	0	0	3	65	9°
Falta de Caminhonete	3	3	1	1	64	10°
Falta de equipamento de apoio	3	3	1	3	84	8°
Falta de operador	5	0	1	5	94	5°
Insp.Equipamento	3	5	1	3	100	4°
Piso irregular	5	3	3	5	136	1°
Prolongamento de Dutos	1	3	3	3	88	6°
Temperatura Painel	5	3	3	5	136	1°
Transporte Gaiola	3	3	0	1	55	11°
Troca de Bit's	3	3	1	1	64	10°

Legenda:
 Correlação forte – 5 Correlação moderada – 3 Correlação fraca – 1 Correlação ausente – 0

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Com referência da Tabela 5 e Figura 5, serão segregadas as possíveis causas identificadas baseada na matriz de esforço, obedecendo a premissa de escolha daqueles problemas que detenham baixo esforço de execução e tempo, e alto impacto ao processo, na qual possam auxiliar a melhoria da utilização.

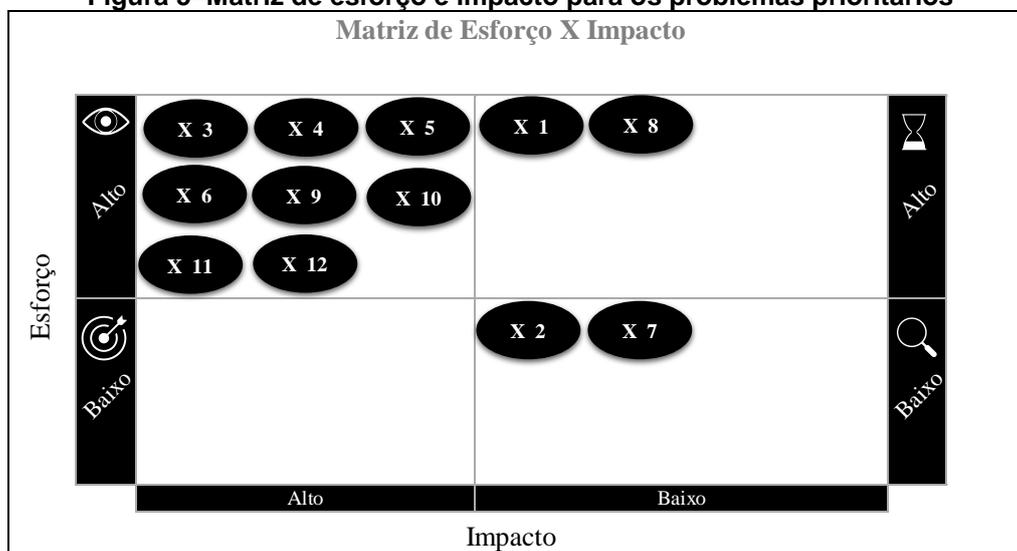
Tabela 5 –Matriz de esforço e impacto

	Entradas do Processo Causas de Paradas Peso	Possíveis Causas Prioritárias			Total	Total (%)	Impacto	Esforço
		Horas de Equipamentos Parados	Sequenciamento de produção	Produção diária				
		10	8	9				
X1	Troca de Bit's	1	3	1	43	4,33%	Baixo	Alto
X2	Insp.Equipamento	1	1	1	27	2,72%	Baixo	Baixo
X3	Emanação de gás	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X4	Aumento Temperatura Paniel	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X5	Atirantamento de Choco	5	3	3	101	10,16%	Alto	Alto
X6	Abatimento de Choco	5	3	3	101	10,16%	Alto	Alto
X7	Prolongamento de Dutos	1	1	1	27	2,72%	Baixo	Baixo
X8	Transporte Gaiola	3	1	1	47	4,73%	Baixo	Alto
X9	Falta de operador	5	5	5	135	13,58%	Alto	Alto
X10	Falta de Caminhonete	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto
X11	Falta de equipamento de apoio	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto
X12	Piso irregular	3	3	3	81	8,15%	Alto	Alto

Legenda:
 Correlação forte – 5 Correlação moderada – 3 Correlação fraca – 1 Correlação ausente – 0

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Figura 5–Matriz de esforço e impacto para os problemas prioritários



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Analisado a Figura 5 foi montada a seguinte escala de priorização:

- ✓ 1º- alto impacto x baixo esforço- (0 oportunidades).
- ✓ 2º- alto impacto x alto esforço- (8 oportunidades).
- ✓ 3º- posição baixo impacto x baixo esforço- (2 oportunidades).
- ✓ 4º- baixo impacto x alto esforço- (2 oportunidades).

Pela matriz de esforço e impacto, não ocorreram oportunidades descritas como: alto impacto x baixo esforço, no qual será dado continuidade ao sequenciamento de priorização de causas avaliadas como: alto impacto x alto esforço. Tiveram oito causas, na qual será optado por aquela com impacto significativo de horas paradas não planejadas.

Como questão inicial para tratativa de perdas produtivas, pode-se optar por aquela que representa o (X4) na matriz de esforço e impacto (aumento de temperatura do painel). Para a análise atual não seria proposto a situação/oportunidade emanação de gás, pela falta de dados, estudos e bases técnicas para a situação avançados. Através do cálculo financeiro pelas perdas produtivas, somente este problema resultou em -22.596 t de ROM, gerando perdas estimadas de R\$ 5.120.000 por produto, conforme memória de cálculo na Figura 6.

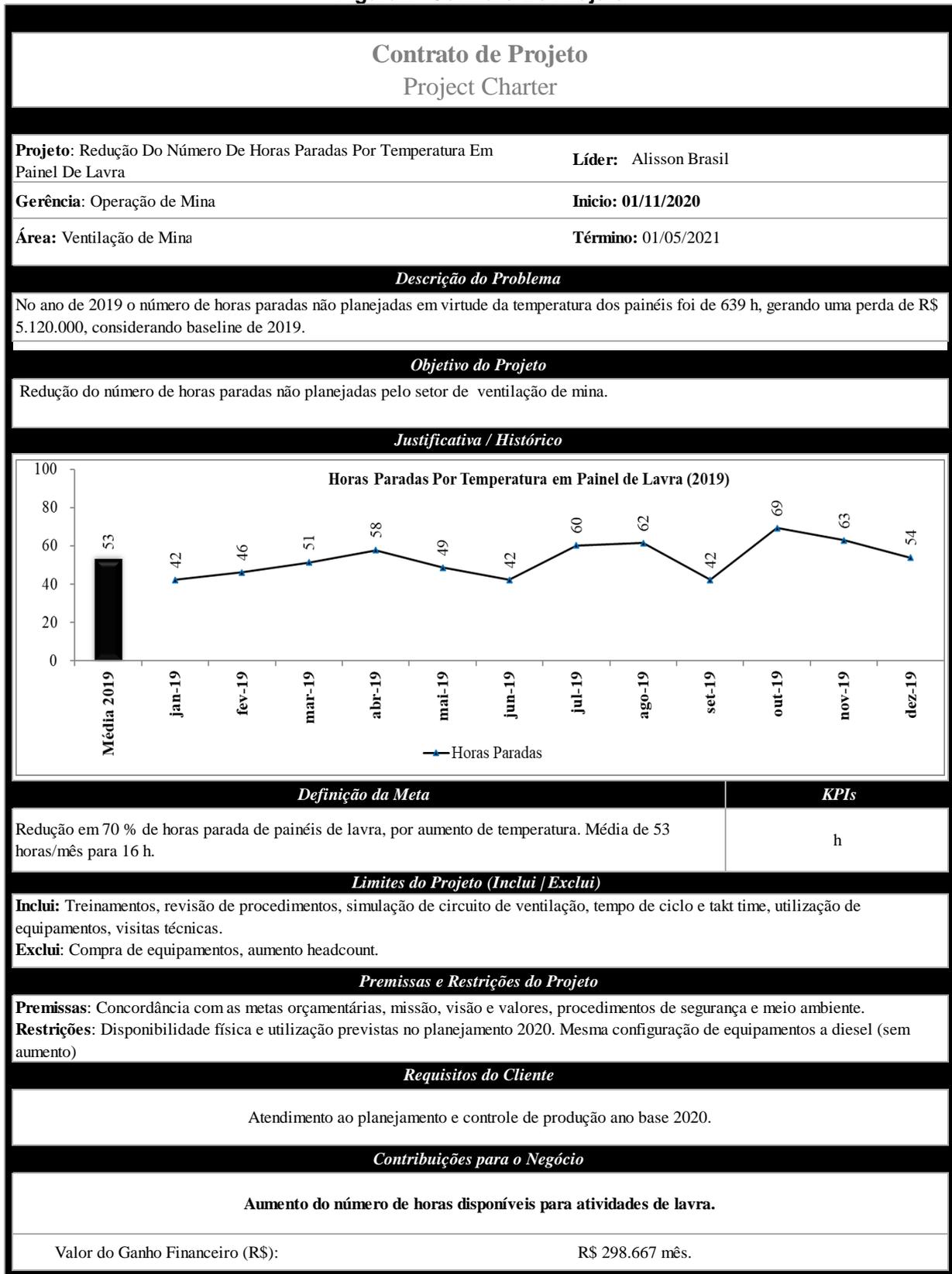
Figura 6 –Matriz de esforço e impacto para os problemas prioritários

MEMÓRIA DE CÁLCULO DE PERDA			
Métricas Financeiras			
	Métrica	Unidade	2.019
Planejado	Volume Programado KCI	kt	484,877
	Margem	R\$/t	1.010
Métricas Técnicas			
	Métrica	Unidade	2.019
Perdas 2019	Horas Paradas Painei	h	639
	Disponibilidade Física	%	73%
	Utilização	%	28%
	Horas Efetivas Paradas	h	131
	Produtividade	t/h	173
	ROM	t	22.596
	Teor	%	25%
	Recuperação Met.	%	82%
	KCI	t	5.071
Resultados Financeiros 2019:			
	Item	Unidade	2.019
Perda	Δ Receita	R\$	5.120.000
	Δ Custo	R\$	0
Estimada	Δ EBITDA	R\$	5.120.000
	Δ Investimento Corrente	R\$	0

Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

Para ações estruturadas poderiam ser realizadas baseando-se na metodologia *Lean Seis Sigma*. O contrato de projeto (*Project Charter*) é a primeira iniciativa, que comprova a descrição do problema, objetivo do projeto, justificativa, metas e ganhos esperados conforme Figura 7. Este projeto se adotado a causa X4 – (aumento de temperatura do painel), poderá ser adotado para redução do número de horas paradas por temperatura em painel de lavra, com redução do número de horas paradas por mês de 53 h para 16 h, representando - 70 % do número de horas indisponíveis.

Figura 7- Contrato De Projeto



Fonte: Contribuição dos Autores (2020)

5. Conclusões

Através da análise do indicador de performance em 2019, a utilização (%) representou o maior percentual de perdas produtivas com perdas percentuais na massa desmontada em 79 %. Verifica-se que o indicador O.E.E (%) tem alta correlação com a produção ($R^2=89,5$ %), o que confirma a importância da análise de indicadores chaves de desempenho no processo atual. Através da análise de perdas, as paradas não planejadas foram tiveram impacto em 4.536 h no processo produtivo, e as paradas planejadas em 2.258 h. As horas paradas não planejadas (PNP) foram responsáveis por 66,8 % do total de paradas, tornando visível que o processo apresenta pontos de melhoria há serem revisados.

A matriz de esforço e impacto não foram verificadas causas com baixo esforço e alto impacto, porém seguindo o preceito de alto impacto no processo, as causas de alto esforço e alto impacto resultaram em oito possíveis causas de estudo. Uma das causas avaliadas em primeira opção (emanação de gás) não entraria em possível estudo de melhoria, por não prover dados locais, dados quantitativos, além do alto esforço por falta de dados científicos. Seguindo o posicionamento das causas ranqueadas estaria a causa do aumento de temperatura do painel (X4), representando um impacto 639 horas/ano nas horas disponíveis ao processo para operação de lavra. Estas horas em 2019 resultaram em perdas produtivas de 22.596 t, equivalendo a R\$ 5.120.000 por venda do produto comercializado, sendo importante a criação de ações em curto espaço de tempo e alto impacto, para redução de paradas na operação de lavra, minimizando os desperdícios de horas paradas disponíveis, com os preceitos por exemplo de ferramentas e metodologias conhecidas (Lean Manufacturing e Seis Sigma). Estas ações poderiam reduzir as horas paradas de 53 h/mensais para 16 h/mensais, podendo gerar incremento estimado de R\$ 298.667 mensais com planos de ações estruturados.

6. Referências

COURA, J.F. (2015). Panorama da Mineração em Minas Gerais. Instituto Brasileiro De Mineração, Sindicato Nacional da Indústria Da Extração do Ferro de Metais, p.280.

CURI, A. **Lavra de Minas**. São Paulo:Ed. Oficina De Textos, 2017.

FRANCISCHINI, P.G. **Indicadores de Desempenho: Dos objetivos à ação- Métodos para elaborar KPIs e obter resultados**. Rio De Janeiro: Ed, Alta Books, 2017.

OHNO, T. **O Sistema Toyota de produção: além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Ed, Bookman, 1997.

WERKEMA, C. **As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Ed, Fundação Christiano Ottoni, 1995