

Planejamento Avançado da Qualidade para Baixo Volume de produção com priorização pelo QRL (*Quality Readiness Level*) e otimização de recursos da Qualidade

Giovanni J Rosa ¹, Geilson Loureiro, PhD ², Alirio Brito, Dr. ³

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

¹Aluno de Doutorado curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais (CSE)

²Coordenador Geral da Engenharia Espacial do INPE e orientador do Giovanni J Rosa

³Doutorado pelo INPE

¹giovanni.jrosa@gmail.com

²geilson.loureiro@inpe.br

³aliriobrito50@gmail.com

Resumo. *A Qualidade do produto é um fator importante para o sucesso de um projeto. Considerando as diversas definições que existem para a Qualidade, a satisfação do cliente e o cumprimento de requisitos é conceito considerado no trabalho. A indústria automobilística tem utilizado há mais de 30 anos o Planejamento Avançado da Qualidade (APQP – Advanced Product Quality Planning) como a base no desenvolvimento de produto para garantir sua Qualidade. A pergunta desenvolvida no trabalho é como adaptar o Planejamento Avançado da Qualidade para a indústria de baixo volume (no caso aeroespacial) e, devido a quantidade de PNs (Part Numbers) – conjuntos ou peças, como criar uma priorização para sua utilização. Para o desenvolvimento do produto, o trabalho propõe a utilização do Planejamento Avançado da Qualidade pela norma AS9145 adaptada com os 13 itens de PPAP (Production Part Approval Process) listados como sendo: projeto ou design, controle de modificações, aprovação da engenharia, FMEA (failure mode and effect analysis), avaliação do sistema de medição, relatório da primeira peça (FAI – first article inspection), resultados dos ensaios acelerados, aprovação de compósitos, treinamento da mão-de-obra, critérios visuais, requisitos específicos do cliente, aprovação de processos especiais, gerenciamento de sub-fornecedores. Para se utilizar todos os itens nos diversos sistemas de um projeto e se otimizar os recursos da Qualidade é proposta uma priorização com o QRL (Quality Readiness Level) que avalia a prontidão baseada no TRL (Technological Readiness Level), MRL (Manufacturing Readiness Level), modificação do produto ou processo, performance de Qualidade na linha de produção e performance de confiabilidade no campo. Ao final do trabalho é mostrado um estudo de caso com utilização do Planejamento Avançado da Qualidade em conjunto com a priorização QRL. Observa-se uma otimização maior que 99% dos recursos de Qualidade, e um resultado de antecipação de 6 anos na curva de Qualidade na linha de produção e 2 anos na confiabilidade do produto no campo no estudo de caso realizado.*

Palavras-chave: Qualidade, Desenvolvimento, Maturidade.

1. Introdução

A Qualidade do Produto em todos os projetos é um fator importante de sucesso. Também após a introdução em produção do item, a Qualidade terá uma contribuição na confiabilidade e na maturidade, também será um fator de competitividade considerando os concorrentes.

Esse trabalho é baseado no artigo escrito sobre Qualidade em Baixo Volume de Produção (ROSA et al, 2015) e tem como objetivo um Sistema de Gestão de Qualidade dos itens em novos desenvolvimentos e projetos considerando uma indústria de baixo volume de produção. Nessa proposta, o estudo de um Sistema de Gestão da Qualidade em baixo volume traz um novo conceito, o de QRL (Quality Readiness Level) que é utilizado para classificar cada sistema ou sub-sistema ou componente. Baseado nessa classificação é proposto um

nível de controle das variáveis de Qualidade a serem evidenciados e otimizar os recursos da Qualidade.

2. Metodologia

A definição de Qualidade é expressa de diversas formas como se pode observar em autores como Juran, Deming e Taguchi. De maneira a simplificar o conceito, considera-se como Qualidade para esse trabalho a satisfação do cliente e o cumprimentos de requisitos.

A Qualidade resultante de um produto pode ser determinada por diversos fatores:

- do desenvolvimento do produto
- do desenvolvimento do processo de fabricação
- dos testes de validações e certificações e também do resultado ao entrar em serviço.
- performance do produto na linha de produção e no cliente com operação em campo

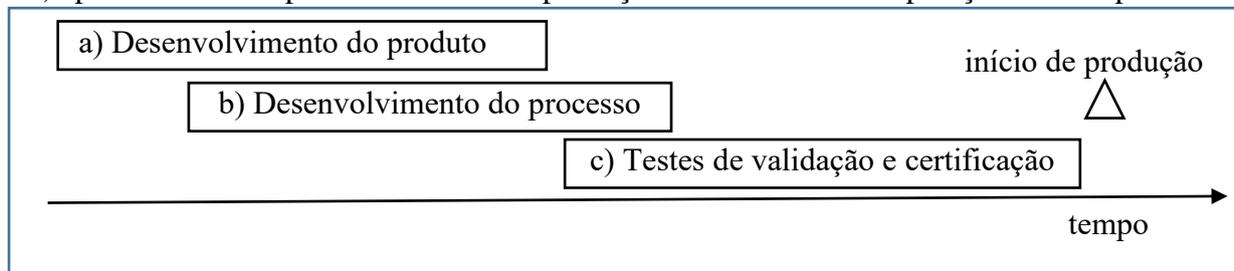


Fig 1 – Qualidade do produto como resultado do desenvolvimento do produto e do processo em conjunto com os testes de validação e certificação. Fonte : adaptado de AS9145.

No desenvolvimento do produto é comum ocorrerem modificações como no Fig. 2. Essas modificações podem ser resultado de revisões (p. ex. No PDR – *preliminary design review*, ou no CDR – *critical design review*, de testes e validações, lições aprendidas etc)

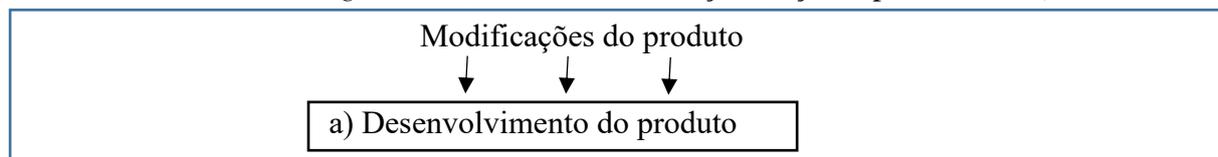


Fig 2 – modificações do produto que acontecem durante o desenvolvimento. Fonte: autores

Também no processo de fabricação podem ocorrer modificações como processos alternativos, fluxo do processo, sequenciamento, novas etapas e também movimentação de local de fabricação

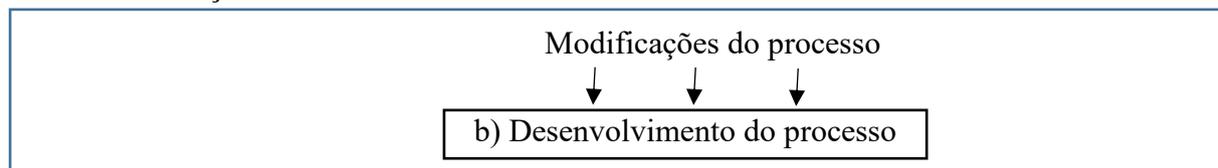


Fig. 3 – modificações do processo que pode ocorrer no desenvolvimento. Fonte: autores

Shenhar e Dvir (2007) mostram que um projeto tem diversos itens a serem considerados para que seja dada a prioridade nesse projeto: Novidade, Tecnologia, Complexidade, Ritmo.

Para validar o conceito acima, no levantamento de 1.600 fornecedores ativos para a empresa aeronáutica, somente 40 fornecedores são responsáveis por 95% dos rejeitos e retrabalhos na linha de produção. Ou seja, 2,5% dos fornecedores.

Assim, é necessário se criar um processo de priorização no desenvolvimento do produto de forma a se otimizar os recursos da Qualidade.

Baseado no artigo Rosa et al (2015), o trabalho a ser desenvolvido se baseia em trazer o conceito de QRL – *quality readiness level*.

Cada sistema e sub-sistema de um produto espacial (por exemplo, satélite) pode ser avaliado quanto ao seu grau de prontidão para a Qualidade e maturidade.

O QRL leva em consideração:

- prontidão da tecnologia (TRL – *technological readiness level*);
- prontidão da manufatura (MRL – *manufacturing readiness level*);
- modificação do produto ou do processo (alteração do processo e movimentação de lugar de produção)
- performance do produto na linha de produção
- performance do produto no campo

A seguir um detalhamento de cada item que compõe o QRL.

1.1 Prontidão da tecnologia – TRL (Technology Readiness Level)

Mankins (2009) e a NASA (agência americana espacial) devolveram o TRL – *tecnology readiness level* para avaliar as diversas tecnologias usadas nos itens e projetos, a escala vai de 1 a 9:

- nível 1 o mais baixo, onde o item tem somente uma concepção
- nível 9 onde a tecnologia já está aprovada e comprovadamente funciona em ambientes para os quais foi projetada (por exemplo, uma placa eletrônica que funcionou sem falhas em satélite já lançado).

1.2 Prontidão da manufatura – MRL (Manufacturing Readiness Level)

Desenvolvido pelo DoD (2011) avalia quanto à manufatura do produto já está pronta, numa escala de 1 a 9:

- nível 1 onde a linha de produção não existe ou só existe a concepção do método de produção, mas sem os equipamentos e linha real
- nível 9 onde a linha de manufatura está implantada e já produziu itens com a Qualidade esperada.

1.3 Modificação do produto ou processo (M.P.P.)

Importante também para se classificar um item quanto ao QRL e saber qual o nível de nível de modificação que será implementado no produto:

MPP = 1 – maior

MPP = 5 – médio

MPP = 9 – menor

1.3 Performance do produto na linha de produção (P.P.L.P)

A performance de um produto na linha de produção tem relação com os níveis de retrabalhos e rejeitos na linha de produção. Por exemplo, um produto que tem em programas similares um nível de 2.000 ppm (*parts per million*) de rejeitos é considerado alto para qualquer tipo de indústria.

A performance de uma produto pode ser classificada em: excelente (zero defeito), média ou ruim (em inglês *poor*):

PPLP = 1 – quantidade de rejeitos na linha > 2.000 ppm (*parts per million*)

PPLP = 5 – quantidade de rejeitos na linha entre 1.000 e 2.000 ppm

PPLP = 9 – quantidade de rejeitos na linha < 1.000 ppm

1.4 Performance do produto no campo (P.P.C.)

A confiabilidade pode ser definida como a capacidade de funcionamento de um item pelo tempo esperado, em condições ambientais definidas.

O valor normalmente utilizado para se medir o desempenho de confiabilidade é o MTTF (*Mean Time To Fail*) que mede o tempo médio para ocorrer a primeira falência do item, ou também é utilizado o MTBF (*Mean Time Between Fail*) que corresponde ao tempo entre múltiplas falências do item, ou seja, acontece a primeira falência, é consertado, volta a funcionar, e ocorre nova falência. Será considerado para esse trabalho o MTBF.

Para a utilização desse indicador e considerando-se que cada componente tem sua respectiva MTBF esperada no projeto, é importante se determinar qual a distância em porcentagem do valor atingido e do valor esperado.

Um exemplo pode ser verificado a seguir:

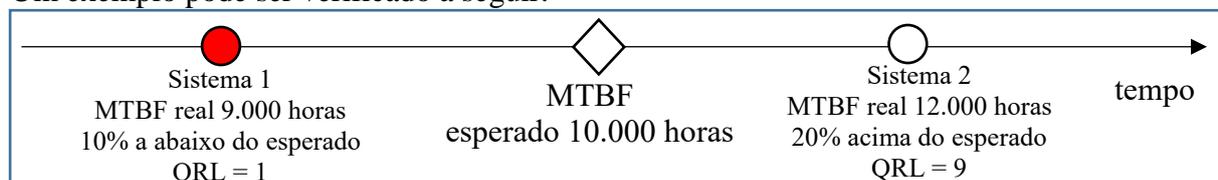


Fig. 4 – proposta para avaliar como o MTBF contribui para o QRL. Fonte: autores

Para a composição do QRL, considera-se o quanto o MTBF está em porcentagem abaixo do esperado:

- PPC = 1 → abaixo do MTBF esperado
- PPC = 5 → está acima com margem de 10%
- PPC = 9 → está acima com margem de 20% do MTBF

1.5 Introdução do QRL – *Quality Readiness Level*

Esse indicador deve ser usado para avaliar o Sistema ou sub-sistema de forma a graduar um nível de prontidão na Qualidade e Maturidade do item.

Considera os elementos: Tecnologia, Complexidade e Ritmo e acrescenta o maturidade da fabricação.

QRL = Valor Tecnologia (TRL) ou Fabricação (MRL) ou M.P.P. ou P.P.L.P ou P.P.C.

(veja Apêndice A)

Para simplificação de terminologia e conceitos, QRL terá os atributos com o Apêndice A:

- QRL = 9 (baixo risco) – sistema ou subsistema com alto nível de prontidão para a Qualidade
- QRL = 1 (alto risco) – sistema ou subsistema com baixo nível de prontidão para a Qualidade

Baseado nos nível de QRL, será feito um planejamento para atingir o alto nível do Sistema, a ser melhor desenvolvido na trabalho de pesquisa.

Também baseado no nível de QRL, será traduzido o nível de requisitos a serem cumpridos para PPAP (Production Part Approval Process) baseado na indústria automobilística (AUTOMOTIVE, 2007) e da indústria aeronáutica (AS9145, 2018; EPPAP, 2019).

Para ilustrar um exemplo de cálculo do QRL, a seguir é feita uma tabela com sistemas fictícios de um satélite na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo fictício de cálculo de QRL, sempre o menor valor dos fatores determina o QRL (*Quality Readiness Level*).

Fonte: autores

	TRL	MRL	Modificação	Produção	Campo	QRL
ACS (<i>Atitude Control System</i>)	9	9	9	9	5 ● →	5
Geração de Energia	6	9	5 ● →	9	9 →	5
TT&C (<i>telemetry, tracking command</i>)	9	9	5 ● →	9	9 →	5
Gestão de bordo	9	9	9	5 ● →	5 →	5
Estruturas e mecanismos	9	9	5 ● →	9	9 →	5
Controle térmico	9	8 ● →	9	9	9 →	8
Propulsão	9	9	9	9	9 ● →	9

Na prática, é necessário se começar com o sistema completa e depois se desdobrar para os subsistemas para determinação do QRL.

1.6 PPAP (*Production Part Approval Process*)

De maneira resumida, PPAP é um documento que possui diversas evidências e itens que comprovam que o sistema ou sub-sistema cumpre com algum requisito de Qualidade.

Na primeira avaliação dos itens a serem validados em um conjunto chamado PPAP (*production part approval process*) que contém 13 itens a serem evidenciados relacionados a Qualidade do sistema conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Itens para PPAP (Production Part Approval Process).

Fonte: adaptado de AS9145

1	projeto ou <i>design</i>
2	controle de modificações
3	aprovação da engenharia
4	FMEA <i>failure mode and effect analysis</i> (AS9145, 2016)
5	avaliação do sistema de medição (AS9145, 2016)
6	relatório da primeira peça (FAI – <i>first article inspection</i>) (AS9102, 2001)
7	resultados dos ensaios acelerados (HOBBS, 2008, McCLEAN, 200)*
8	aprovação de compósitos (NADCAP, 2020) **
9	treinamento da mão-de-obra
10	critérios visuais
11	requisitos específicos do cliente
12	aprovação de processos especiais (AS9100, 2001)
13	gerenciamento de sub-fornecedores

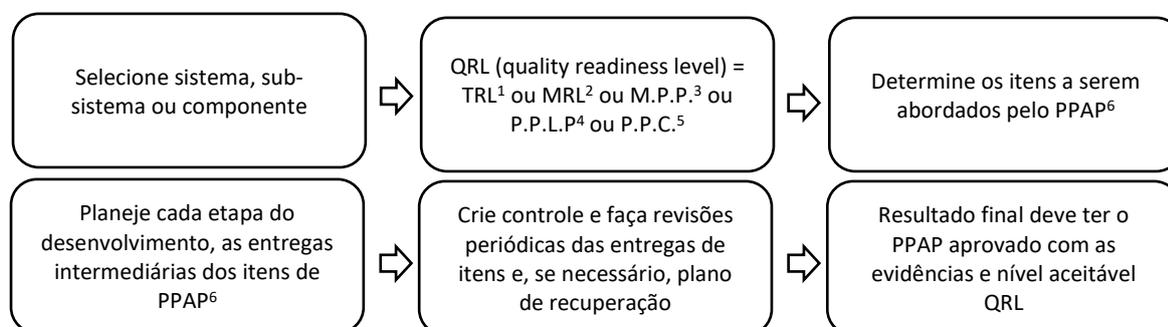
* somente para PNs (*Part Numbers*) com componentes eletrônicos

** somente para PNs (*Part Numbers*) com componentes em compósitos

1.7 Sequência para gestão de desenvolvimento de Qualidade em sistemas e sub-sistemas

A Fig.6 tem a sequência da proposta de tomada de decisão como determinar o QRL (Quality Readiness Level) e sobre itens do PPAP a serem utilizados, o desenvolvimento e

acompanhamento desses itens, assim como um plano de recuperação para os itens que estiverem atrasados em relação do cronograma do projeto.



¹TRL: Technological Readiness Level

²MRL: Manufacturing Readiness Level

³MPP: Modificação de Produto ou Processo

⁴P.P.L.P: Performance do Produto na Linha de Produção

⁵P.P.C: Performance do Produto no Campo

⁶PPAP: Production Part Approval Process (veja tabela 2)

Figura 6 – Fluxo de determinação do QRL (Quality Readiness Level) e gestão do sistema para finalizar o PPAP (Production Part Approval Process). Fonte: autores

1.7 Itens do PPAP definidos baseando-se no QRL

Sistemas ou subsistemas que têm um QRL alto (7-9) não necessitam de desenvolver os itens do PPAP considerando-se que a maturidade do item é alta, ou seja, têm uma prontidão tecnológica e de processo, tem performance alta na linha de produção e no campo e não sofrem modificações de produto ou processo. Para itens com QRL 1-5 é necessário o desenvolvimento do PPAP com todos os itens.

Tabela 3 - QRL (Quality Readiness Level) e itens de PPAP a serem apresentados. Fonte: autores

QRL	1. Projeto ou design	2. Controle de modificações	3. Aprovação da engenharia	4. FMEA	5. Sistema de medição	6. FAI	7. Ensaios acelerados	8. Aprovação compostos	9. Mão-de-obra	10. Critérios visuais	11. Requisitos do cliente	12. Processos especiais	13. Sub-fornecedores.
1	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7	●					●							
8	●					●							
9	●					●							

● item de PPAP a ser desenvolvido.

3. Resultados e Discussão

Em uma empresa de aeronáutica foi utilizado o método acima, com priorização feita similar ao QRL, os sistemas foram classificados em A, B, C, D, E, F, correspondentes aos níveis 1 a 9 do QRL, sendo que A = 1 e F = 9.

3.1 Otimização do recurso de Qualidade

Uma aeronave tem estimado um total de 60.000 itens ou PNs (*Part Numbers*). Para se obter o número estimado de recursos da Qualidade (pode ser considerado um engenheiro da Qualidade), fez-se o filtro do apêndice A e a Fig 7 mostra o resultado significativamente menor da quantidade de PNs.

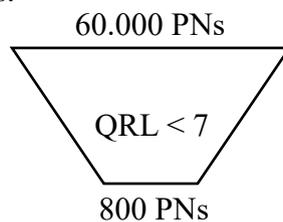


Figura 7 – filtro dos PNs que têm QRL < 7. Fonte: autores

A tabela 4 mostra como pode ser feito o cálculo estimado de quantidade de Engenheiros da Qualidade.

Tabela 4 – Estimativa da quantidade de recursos da Qualidade desenvolvimento de aeronave
Fonte: autores

	sem QRL ²	QRL ² < 7
Total de PN ¹ em uma aeronave	60.000PNs	60.000PNs
A) Quantidade de PN ¹ para PPAP ³	60.000PNs	800PNs
B) Quantidade de itens do PPAP ³	* 13	* 13
C) Itens PPAP ³ a serem recebidos	780.000	10.400
D) Horas totais (A.C) . 25 horas por artefato	19.500.000h	260.000h
E) Horas/ano (considerando-se 4 anos desenvolvimento) (D/4)	4.875.000h	65.000h
F) Quantidade recurso Qualidade (engenheiro Qualidade)	2.708	-98% 36

¹PN: *Part Number* (cada sub-sistema ou componente recebido na linha de montagem)

²QRL: *Quality Readiness Level* (veja Tabela 3 para interação entre PPAP e QRL)

³PPAP: *Production Part Approval Process* (veja Tabela 2 para os itens de PPAP)

Com o uso do QRL é necessário se utilizar PPAP somente para 800 PNs (*Part Numbers*), e não para os 60.000 PNs, e se conseguir o mesmo resultado de Qualidade ou Maturidade, ou seja, para se obter o resultado necessário. São necessários 36 engenheiros da Qualidade, o que significa 2% do que seria necessário, uma otimização de 98% do trabalho devido ao processo de priorização do QRL. Esse número de engenheiros da Qualidade é menor se for considerado:

- Compósitos são aplicados somente a PNs como compósitos em sua estrutura
- Ensaio Acelerados são aplicados somente para PNs relacionados a eletrônicos
- FAI (*First Article Inspection*) é feito pela linha de produção (técnicos da Qualidade) e não utilizam diretamente o time de desenvolvimento e engenheiros da Qualidade.

3.2 PPAP implementado

Foi implementado o PPAP e durante 4 anos foram desenvolvidos os elementos de PPAP. O resultado está disponível na Tabela 5 da quantidade de elementos de PPAP coletados.

Tabela 5 – Quantidade de elementos de PPAP desenvolvidos para o projeto da aeronave
Fonte: autores

Elemento de PPAP	(60) Fornecedores	(4) Linhas internas
1 projeto ou design	330	
2. controle de modificações	20	
3. aprovação da engenharia	330	
4. PFMEA (Process Failure Mode and Effects Analysis)	380	50
5. avaliação do sistema de medição (AS9145, 2016)	170	10
6. FAI (First Article Inspection)	500	300
7. resultados dos ensaios acelerados (HOBBS, 2008, McCLEAN, 200)*	225	
8. aprovação de compósitos (NADCAP, 2020) **	30	30
9. treinamento de mão-de-obra	200	60
10. critérios visuais	290	
11. requisitos específicos do cliente	20	
12. aprovação de processos especiais (AS9100, 2001)	230	50
13. gerenciamento de sub-fornecedor	210	

Total = 3.435 itens

Observação: números são valores aproximados de forma a ilustrar o estudo de caso.

3.2 Quantidade de engenheiros da Qualidade utilizada para implementar PPAP

A tabela 6 contém a quantidade de engenheiros da Qualidade utilizados durante 4 anos para desenvolverem ou coletarem os itens da Tabela 5.

Tabela 6 – Quantidade real de engenheiros da Qualidade no projeto da empresa aeronáutica
Fonte: autores

	com QRL ²
A) Quantidade de PN ¹ para PPAP ³	800PNs
B) Itens PPAP ³ recebidos	3.435
C) Horas totais (A.B) . 25 horas por artefato	85.875h
D) Horas/ano (considerando-se 4 anos desenvolvimento) (C/4)	21.468h
E) Quantidade recurso Qualidade (engenheiro Qualidade)	12

Foram 14 engenheiros para desenvolverem o PPAP com os fornecedores e 4 engenheiros os itens de PPAP para as linhas de montagem internas.

3.2.1 Exemplo de ensaios acelerados (item 7 da Tabela 5)

Aviônica para aeronave

Dos 30 PNs avaliados, 10 não estavam atingindo o MTBF necessário, ou seja, QRL = 1 Realizados ensaios acelerados com vibração e temperatura e implementadas melhorias nos PNs. Nenhum PN falhou nos primeiros 2 anos no campo na entrada em serviço da aeronave.

Sistema de inertização com Nitrogênio do tanque de combustível

Caixa eletrônica controladora do sistema de inertização com N₂ foi testada com ensaio acelerado de vibração e temperatura conforme Tabela 7, não atingiu a especificação. Feita a modificação e passou a ter uma margem de 25°C de temperatura.

Tabela 7 – exemplo de melhoria do produto com ensaio acelerado de vibração e temperatura
Fonte: autores

Elemento de PPAP	Temperatura máxima do Controlador	Temperatura máxima do Controlador após melhoria *
HALT (<i>highly accelerated life test</i>)	65°C	95°C
Margem para a temperatura máxima do envelope (70°C)	-5°C	25°C

* melhoria: novo recozimento do núcleo plástico de uma das válvulas e mudança de design.

Zero defeito na entrada em serviço da aeronave para esse controlado do sistema de inertização da aeronave.

3.2.2 Exemplo PFMEA (*Process Failure Mode and Effects Analysis*) (item 4 Tabela 5)

Comando de voo

Sistema de controle de voo com as pedaleiras para o piloto.

Fornecedor não tinha linha de produção para o item → MRL = 1 → QRL = 1

Feita a determinação da sequência de processo, PFMEA e plano de controle.

Zero defeito na entrada em serviço de falha de montagem nos primeiros 2 anos da aeronave.

3.2 Resultado da aeronave após início de produção e entrega com a utilização do QRL e PPAP

A tabela 8 a seguir mostra o resultado da Qualidade da aeronave após entrada em serviço.

Tabela 8 – tempo para atingir a Qualidade em custo da não-Qualidade e confiabilidade
Fonte: autores

	Projeto 1 sem PPAP	Projeto 2 com PPAP	Diferença
Custo da não Qualidade (< 2% do custo aeronave)	8 anos	2 anos	- 6 anos
Confiabilidade aeronave (> 99% schedule reliability ¹)	4 anos	2 anos	- 2 anos

¹*Schedule reliability* = aeronave que tenha mais de 15 min de atraso na saída do gate, 100% significa que não houve aeronave com mais de 15 min de atraso, 99% significa que a cada 100 viagens, 1 atrasou mais de 15 min no gate do aeroporto.

Otimização de recursos de engenharia de Qualidade:

Sem priorização por QRL = 60.000 Part numbers → necessidade de 2.900 engenheiros

Com priorização por QRL = 800 Part numbers → necessidade de 18 engenheiros

4. Conclusão

O Planejamento Avançado da Qualidade é utilizado há mais de 30 anos na indústria automobilística. O PPAP (*Production Part Approval Process*) é a materialização e evidência objetiva que o Planejamento Avançado da Qualidade foi utilizado no desenvolvimento de um novo produto.

O trabalho propõe a utilização do Planejamento Avançado da Qualidade para a indústria aeroespacial com 13 elementos do PPAP, e, para uma otimização de recurso de engenheiros da Qualidade, um processo de priorização em quais PNs (*Part Numbers*) o PPAP deve ser utilizado no desenvolvimento.

Para a priorização da utilização do PPAP é proposto o QRL (*Quality Readiness Level*) que é um valor baseado na maturidade do produto (TRL – *Technological Readiness Level*), na

maturidade do processo de fabricação (MRL – *Manufacturing Readiness Level*), nas modificações de produto e processo, na performance do PN na linha de produto e campo.

O estudo de caso utilizado mostra como resultado atingido com a utilização de QRL:

- redução do universo de 60.000 PNs para 800 PNs que foram acompanhados com os elementos de PPAP
- redução da necessidade de 2.700 engenheiros da Qualidade para 18 engenheiros.

O estudo de caso utilizado também mostra os resultados de se utilizar o Planejamento Avançado da Qualidade e desenvolvimento dos elementos de PPAP (Tabela 8):

- antecipação de 6 anos nos custos de não-Qualidade (< 2% em relação ao custo da aeronave)
- antecipação de 2 anos na confiabilidade da aeronave no campo, atingindo 90% de *schedule reliability*¹.

¹*Schedule reliability* = aeronave que tenha mais de 15 min de atraso na saída do gate, 100% significa que não houve aeronave com mais de 15 min de atraso, 99% significa que a cada 100 viagens, 1 atrasou mais de 15 min no gate do aeroporto.

Agradecimentos: aos nossos familiares que nos apoiam em todos os trabalhos desenvolvidos e têm a paciência para nos liberarem de horas que poderíamos estar em atividades conjuntas.

Referências

- AS13003. *AEROSPACE STANDARD* - Measurement Systems Analysis Requirements. SAE. 2015
- AS9145. *Aerospace Series* – Requirements for Advanced Product Quality Planning and Production Part Approval Process. SAE International. 2016
- AS9100. *Quality Systems - Aerospace - Model for Quality Assurance in Design, Development, Production, Installation and Servicing*. SAE International. 2001
- AS9102. *Aerospace First Article Inspection Requirement AS9102*. SAE International. 2001
- AUTOMOTIVE Industry Action Group - AIAG. *PPAP - Production Part Approval Process*. www.aiag.org.
- DoD DEPARTMENT of Defense. *Manufacturing Readiness Level definitions*. http://www.dodmrl.com/MRL_Definitions_2010.pdf. 2011
- EPPAP Embraer Production Part Approval Process. Disponível em: <<https://www.embraersuppliers.com/esuppliers/#/en-US/supplier-requirements>>. Acesso em 18.10.2019
- HOBBS, G. K. *HALT and HASS* - the accepted quality and reliability paradigm. www.hobbsengr.com, 2008
- IAQG. *Aerospace Advanced Product Quality Planning* (Aerospace APQP) [http://www.sae.org/iaqg/meetings/2013/montreal/Aerospace Advanced Product Quality Planning \(Aerospace APQP\)](http://www.sae.org/iaqg/meetings/2013/montreal/Aerospace%20Advanced%20Product%20Quality%20Planning%20(Aerospace%20APQP)). 2013
- MANKINS, J. C. *Technology readiness assessments: a retrospective*. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/actaastro> Acesso em 18.10.2020
- NADCAP. *PRI – Performance Review Institute*. Disponível em: <<http://p-r-i.org/nadcap/>> Acesso em: 18.10.2020
- ROSA, G. J., Nascimento, J. M., CHAGAS Jr, M. F. *Quality Management System of Suppliers - Low Volume Industry - Quality Readiness Level – QRL*. 66th International Astronautical Congress, Jerusalem, Israel. 2015
- SHENHAR, A. J., DVIR, D. *Reinventando gerenciamento de projetos: a abordagem diamante ao crescimento e inovação bem-sucedidos*. São Paulo: M. Books do Brasil Editora. 2007
- YASSUDA, I. S., Chagas, M. F., Perondi, L. F. *Proposta de Artefato Para Caracterização de Projetos Espaciais*. 2012

Apêndice A – Tabela completa do QRL (Quality Readiness Level)

QRL	TRL	MRL	Performance linha de produção	Performance campo
1	Princípios básicos observados.	Implicações básicas de manufatura identificadas.	Rejeitos ou retrabalhos > 25%	MTBF < 50% MTBF contrato
2	Conceitos tecnológico e/ou aplicação formulada	Conceitos de manufatura identificados.		
3	Prova de conceito para as funções críticas de forma analítica ou experimental.	Prova de conceito de manufatura desenvolvido.	Rejeitos ou retrabalhos > 10%	MTBF < 75 % MTBF contrato
4	Validação do sistema, sub-sistema ou componente em ambiente de laboratório (isto é, ambiente de protótipo).	Capacidade de produzir a tecnologia em ambiente laboratorial.		
5	Validação do sistema, sub-sistema ou componente em um ambiente relevante.	Capacidade de produzir componentes do protótipo em ambiente relevante de produção.	Rejeitos ou retrabalhos > 0,2%	MTBF = MTBF contrato
6	Demonstração do sistema, sub-sistema ou componente em um ambiente com o envelope de operação.	Capacidade de produzir um sistema ou sub-sistema de protótipo em ambiente relevante de produção.		
7	Demonstração do protótipo em um ambiente com representatividade da realidade.	Capacidade de produzir sistemas, sub-sistemas ou componentes em ambiente representativo de produção.	Rejeitos ou retrabalho > 0,1%	MTBF > 10% MTBF contrato
8	Sistema real completo e certificado com teste e demonstração	Capacidade de produção de linha piloto demonstrada, pronto para produzir em baixa escala.		
9	Sistema real provado em operação com sucesso no ambiente final.	Produção em baixa escala demonstrada. Capacidade de iniciar produção em escala.	Rejeitos ou retrabalhos < 0,1%	MTBF > 20% MTBF contrato