

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

Metodologia HALT no desenvolvimento de produtos em uma indústria de linha branca

Chrys Marcell Antunes

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima

São Carlos - SP

2025

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Profa. Dra. Alice Medeiros de Lima, DEQ/UFSCar São Carlos

Convidado: Prof. Dr. Diego Andrade Lemos, DEQ/UFSCar São Carlos

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Ruy de Sousa Junior, DEQ/UFSCar São Carlos

Apresentado no dia _____ de _____ de _____ perante a banca examinadora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha trajetória acadêmica. À minha mãe, pelo amor incondicional, pelo exemplo de dedicação e pelo apoio constante em cada etapa do caminho. Aos meus irmãos, pelo companheirismo e incentivo, que sempre me motivaram a seguir em frente. À minha namorada, pelo carinho, paciência e compreensão ao longo desse processo, estando sempre ao meu lado nos momentos mais desafiadores e estimulando o meu crescimento.

Ao meu mentor do estágio, pelos ensinamentos valiosos e por contribuir significativamente para meu desenvolvimento profissional e acadêmico. À minha orientadora, pelo suporte durante a realização deste trabalho e pelas contribuições ao longo do processo. Aos amigos verdadeiros e valiosos que fiz durante minha jornada na graduação, que compartilharam comigo desafios, conquistas e aprendizados. A amizade e o apoio de vocês tornaram essa caminhada muito mais leve e especial.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, me apoiaram nessa caminhada, expresso minha mais sincera gratidão.

RESUMO

A indústria de linha branca abrange produtos como refrigeradores, freezers e condicionadores de ar, com foco em tecnologias maduras e pouca inovação disruptiva. As exigências das grandes montadoras de linha branca levaram à implantação de sistemas de gestão de qualidade, redução no número de fornecedores e aumento na dependência entre montadoras e fornecedores. A metodologia HALT (Highly Accelerated Life Testing) é destacada como essencial para detectar problemas prematuramente no desenvolvimento de produtos, garantindo maior confiabilidade e qualidade, contribuindo, assim, para uma vantagem competitiva ao permitir a introdução de produtos robustos no mercado antes dos concorrentes e reduzir custos com retrabalhos e recalls. Este trabalho consiste em uma revisão de literatura, de caráter exploratório e descritivo, cujo objetivo foi ressaltar a importância da metodologia HALT (Highly Accelerated Life Testing) no desenvolvimento de produtos na indústria de linha branca. As principais bases de dados utilizadas incluíram Google Acadêmico, Scopus e ScienceDirect. A análise envolveu uma leitura crítica e sistemática das fontes selecionadas e a síntese dos resultados foi apresentada de forma a destacar as principais tendências e conclusões sobre a indústria de linha branca, o processo de desenvolvimento de produtos, a confiabilidade e as metodologias de testes acelerados, incluindo a aplicação da HALT, a fim de oferecer uma visão abrangente sobre como essa metodologia contribui para o desenvolvimento e a confiabilidade dos produtos na indústria de linha branca. Pode-se observar que com a utilização da metodologia através de um estudo de caso foi possível avaliar a confiabilidade de um componente feito por um novo fornecedor para validar se o mesmo atende ao ciclo de vida do produto, baseado na utilização do consumidor.

Palavras-chave: Highly Accelerated Life Test, Indústria de Linha Branca, Confiabilidade e Desenvolvimento de Produto.

ABSTRACT

The white goods industry encompasses products such as refrigerators, freezers, and air conditioners, focusing on mature technologies with limited disruptive innovation. The demands of major white goods manufacturers led to the implementation of quality management systems, a reduction in the number of suppliers, and increased dependency between manufacturers and suppliers. The Highly Accelerated Life Testing (HALT) methodology is highlighted as essential for detecting early-stage issues in product development, ensuring greater reliability and quality, thus providing a competitive advantage by allowing the introduction of robust products to the market before competitors and reducing costs related to rework and recalls. This paper is a literature review, exploratory and descriptive in nature, aimed at emphasizing the importance of HALT in the product development process within the white goods industry. The main databases used were Google Scholar, Scopus, and ScienceDirect. The analysis involved a critical and systematic reading of the selected sources, and the synthesis of results was presented to highlight key trends and conclusions about the white goods industry, product development, reliability, and accelerated testing methodologies, including the application of HALT, to provide a comprehensive view of how this methodology contributes to product development and reliability in the white goods industry. It can be observed that the use of the methodology through a case study allowed the evaluation of the reliability of a component produced by a new supplier to validate whether it meets the product's life cycle based on consumer usage.

Keywords: HALT (Highly Accelerated Life Testing), White goods industry, Product reliability and Product Development

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Eletrodomésticos - Brasil.....	21
Figura 2: Domicílios Particulares segundo suas Características.....	21
Figura 3 - Etapas do Processo de Desenvolvimento de Produto.....	25
Figura 4 - Relação entre quantidade de escolhas custo de modificação e grau de incerteza com o passar do tempo no PDP.....	29
Figura 5 - Atividades a serem realizadas durante as fases do PDP para que a confiabilidade do produto seja atingida.....	32
Figura 6 - Ciclo PDCA para atividades de confiabilidade.....	34
Figura 7 - A função de risco prototípica (taxa de falha) antes e depois do HALT.....	40
Figura 8 - Uma representação visual das margens operacionais em expansão devido ao HALT.....	41
Figura 9 - Divisão entre falhas por tipo de estresse.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Mudanças na indústria mundial de eletrodomésticos de linha branca.....	14
---	----

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e a descrição dos produtos - Brasil - 2022.....	22
---	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 INDÚSTRIA DE LINHA BRANCA.....	13
2.2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO.....	22
2.3 CONFIABILIDADE.....	30
2.4 METODOLOGIAS DE TESTES ACELERADOS (HALT).....	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4. DISCUSSÃO.....	44
5. CONCLUSÃO.....	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

A indústria de linha branca no Brasil integra o complexo eletroeletrônico do país, que também abrange bens eletrônicos de consumo, telecomunicações, informática e automação industrial. Este segmento inclui produtos como refrigeradores, freezers e condicionadores de ar, e é caracterizado por uma maturidade tecnológica que resulta em pouca inovação disruptiva, apesar de novos produtos serem frequentemente lançados. O processo produtivo da linha branca envolve atividades intensivas em corte, dobra, furação e injeção de plásticos, sendo que os componentes tecnológicos mais avançados estão presentes em fornos micro-ondas, lavadoras e refrigeradores (CADAMURO, 2012).

De acordo com Cadamuro (2012), a indústria de linha branca no Brasil passou por um processo de desnacionalização após a abertura econômica de 1990, quando grandes empresas familiares foram adquiridas por multinacionais estrangeiras. Este processo trouxe investimentos diretos e promoveu uma reestruturação significativa no setor, alterando sua estrutura e estratégias de atuação. As mudanças na cadeia produtiva, composta por siderúrgicas, metalúrgicas e petroquímicas, resultaram em maior especialização e na necessidade de externalização das operações, reforçando a relação entre montadoras e fornecedores (CADAMURO, 2012).

Ademais as exigências das grandes montadoras de linha branca levaram à implantação de sistemas de gestão de qualidade e auditorias periódicas, além da redução no número de fornecedores e um aumento na dependência entre montadoras e fornecedores. Essas mudanças são cruciais para garantir a eficiência e a competitividade do setor, destacando a importância de estratégias de produção bem estruturadas e adaptáveis às demandas do mercado (CADAMURO, 2012).

O desenvolvimento de produtos pode ser descrito como um conjunto de atividades que visa definir as especificações de design de um produto e do processo de produção, garantindo que ele possa ser fabricado de forma eficiente. Nesse processo, é fundamental captar as necessidades do mercado, considerar as possibilidades e restrições tecnológicas, e alinhar

essas informações com as estratégias competitivas e de produto da empresa (ROZENFELD et al., 2006). Assim, o desenvolvimento de produto pode ser entendido através da compreensão de todas as atividades que transformam as necessidades do mercado e as oportunidades tecnológicas em informações para a produção (PIMENTA, 2009).

No processo de desenvolvimento de um produto, a transição do design virtual para componentes tangíveis é uma etapa crucial que começa com a criação de protótipos em quantidades limitadas. Inicialmente, esses protótipos servem mais para demonstração do que para operação real, mas, conforme o desenvolvimento avança, esses componentes são montados em subsistemas operáveis, que, por sua vez, podem ser combinados em sistemas mais complexos. Contudo, é comum que esses sistemas e subsistemas iniciais não desempenhem suas funções conforme o esperado ou não alcancem o nível de desempenho por um período prolongado. A integração desses subsistemas pode, ainda, introduzir novos desafios de desempenho. Portanto, alcançar um sistema final que opere de maneira confiável e duradoura requer múltiplas iterações e melhorias de design, o que destaca a importância de um processo contínuo de refinamento e testes durante o desenvolvimento do produto (JAYATILLEKA; OKOGBAA, 2006).

A metodologia HALT permite que os engenheiros detectem e corrijam problemas durante as fases iniciais do desenvolvimento, antes que o produto entre na fase de produção em larga escala. Ao submeter os produtos a estresses mais severos, o HALT assegura que apenas os produtos com designs mais confiáveis passem para a fase de produção e então sejam lançados no mercado com uma maior confiabilidade. Esse processo não só melhora a confiança do consumidor na marca, como também reduz a necessidade de retrabalhos caros e demorados, otimizando o ciclo de desenvolvimento. Assim, a metodologia contribui para a criação de produtos de alta qualidade, que atendem ou superam as expectativas dos consumidores (MCLEAN, 2009).

A importância do HALT também se reflete na vantagem competitiva que ele oferece às empresas. Ao permitir a introdução de produtos mais robustos e confiáveis antes dos concorrentes, o HALT possibilita que as empresas capturem uma maior fatia de mercado e estabeleçam um padrão de qualidade. Essa vantagem é crucial em um mercado competitivo,

onde a capacidade de lançar produtos confiáveis de forma rápida pode definir a liderança de uma empresa em seu setor. Um benefício adicional para uma introdução precoce de produto maduro é que no mercado atual a janela de oportunidade é geralmente estreita. Se a introdução do produto for atrasada, a janela pode ser perdida e a introdução do produto pode até ser cancelada. Portanto, a aplicação do HALT se torna um diferencial estratégico para a competitividade no mercado (MCLEAN, 2009).

O objetivo deste trabalho é ressaltar a importância da metodologia HALT (Highly Accelerated Life Testing) no desenvolvimento de produtos na indústria de linha branca. A HALT propõe a exposição dos produtos a condições extremas, como altos níveis de estresse térmico e vibração, para acelerar a identificação de falhas e aprimorar a confiabilidade dos produtos. Portanto, o estudo visa demonstrar como essa metodologia contribui para a criação de produtos robustos e confiáveis, melhorando o posicionamento da marca no mercado de linha branca.

Além da revisão bibliográfica sobre a metodologia e sua aplicação no setor, será realizado um estudo de caso que analisa a validação de um componente fornecido por uma nova empresa. Através da submissão de amostras a testes acelerados, busca-se verificar se o fornecedor atende aos requisitos de durabilidade e desempenho exigidos, contribuindo para a qualificação de novos parceiros e a robustez dos produtos finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INDÚSTRIA DE LINHA BRANCA

Conforme Cadamuro (2012), o setor de bens eletrônicos de consumo é composto por diversos segmentos, entre eles: Linha Branca (refrigeradores, freezers verticais e horizontais, condicionadores de ar, lavadoras de louça, lavadoras de roupas, secadoras, fornos de micro-ondas, fogões, coifas e exaustores) — principal foco deste estudo; Imagem (televisores, DVDs, videocassetes, câmeras de vídeo e foto); e Som (rádios, gravadores, tocadores de CDs, entre outros). O segmento de Linha Branca se destaca pela maturidade tecnológica, apresentando poucas inovações, mesmo com o lançamento de novos produtos. Os produtos desse segmento são caracterizados por processos intensivos de corte, dobra, furação, tratamento, pintura e injeção de plástico, com baixa complexidade tanto no produto quanto no processo. Os componentes de maior sofisticação tecnológica estão presentes em fornos de micro-ondas, lavadoras, refrigeradores, freezers e condicionadores de ar, sendo os compressores os principais componentes, concentrando o maior nível tecnológico nos sistemas de controle de ciclo.

De acordo com Matusita (1997), os mercados mais antigos de linha branca são o norte-americano e o europeu. Nos Estados Unidos, a popularização dos eletrodomésticos teve início na década de 1920, impulsionada pela diversificação da indústria elétrica e pelos avanços tecnológicos ocorridos no período entre guerras. Já na Europa, particularmente na Inglaterra, esse processo só começou a partir da década de 1950.

Entre 1970 e 1980, tanto o consumo de bens norte americano quanto o europeu já se encontrava em estagnação. Assim, a partir dos anos 90 os grandes grupos sofriam forte pressão para a busca de novos mercados (CALIFE, 2008).

De acordo com Gitahy e Da Luz (2008), Durante as décadas de 1970 a 1990 a indústria de eletrodomésticos de linha branca passou por um intenso processo de mudanças (Quadro 1), destacando-se:

a) o processo de concentração e especialização que substituiu gradativamente o perfil heterogêneo no que se refere ao tamanho e tipo de empresa por um número reduzido de grandes empresas especializadas;

b) a internacionalização da produção, processo pelo qual tem ocorrido a expansão da capacidade produtiva para mercados emergentes e a aquisição das empresas nacionais por grandes corporações multinacionais;

c) a difusão de inovações tecnológicas e organizacionais, intensificando o processo de reestruturação produtiva das principais empresas do setor.

Quadro 1 - Mudanças na indústria mundial de eletrodomésticos de linha branca

Década de 1970	<p>Estrutura: heterogênea — coexistência de empresas de diferentes portes (pequena, média e grande) e tipos (especializada e diversificada).</p> <p>Estratégias: predominância do caráter nacional ou regional; dupla segmentação do mercado (espaço e renda); ausência do processo de reestruturação produtiva; início da difusão de inovações de processo.</p>
Década de 1980	<p>Estrutura: início do processo de especialização setorial e de internacionalização da produção — presença de um número reduzido de grandes empresas e início das aquisições e fusões de empresas do setor.</p> <p>Estratégias: início do processo de internacionalização produtiva (expansão da capacidade produtiva pela aquisição e fusão com produtores locais); predominância da segmentação de mercado por renda; introdução de inovações de produto e processo; início do processo de reestruturação produtiva.</p>
Década de 1990	<p>Estrutura: produção restrita a um pequeno número de empresas especializadas e internacionalizadas.</p> <p>Estratégias: intensificação da internacionalização produtiva (ênfase para os mercados emergentes); predominância da segmentação do mercado por renda; intensificação das inovações de produto e processo; intensificação da reestruturação produtiva.</p>

Fonte: Gitahy; Da Luz (2008).

Segundo Cunha (2003), a indústria de linha branca pode ser caracterizada como um exemplo de oligopólio misto global, dominado por um número reduzido de grandes empresas

especializadas e internacionalizadas que controlam tanto a produção quanto o mercado internacional. Entre essas empresas, destacam-se Whirlpool (EUA), Electrolux (Suécia), General Electric (EUA), Bosch-Siemens (Alemanha), Haier (China), Maytag (EUA), Merloni (Itália), Miele (Alemanha), Elco Brandt (França), Liebherr (Alemanha) e Amaná (EUA).

De acordo com Araújo et al. (2004) apud Gitahy e Da Luz (2008), o contexto de maturidade tecnológica da indústria de eletrodomésticos e a saturação do consumo desses produtos tradicionais nos mercados de países desenvolvidos reduziram a capacidade de manutenção da alta rentabilidade desse oligopólio. Isso ocorreu devido à discrepância entre o potencial de crescimento das empresas e o ritmo de expansão da demanda em seus mercados tradicionais. Para enfrentar essa situação, as empresas buscaram eficiência através da racionalização e modernização de suas estruturas produtivas, com o objetivo de reduzir custos de produção e comercialização. Além disso, a exploração de mercados internos e regionais foi vista como uma estratégia para ampliar a rentabilidade, o que intensificou o processo de internacionalização produtiva. A aquisição de empresas locais por multinacionais têm se concentrado em países emergentes que oferecem baixos custos de produção, mercados consumidores com potencial de crescimento e políticas favoráveis à atração de investimentos. Nesse cenário, o Brasil se destaca na produção de eletrodomésticos tradicionais, como fogões e refrigeradores.

No Brasil, o segmento da Linha Branca experimentou um crescimento significativo no final da década de 1940, impulsionado pela política de substituição de importações da época, que resultou em uma série de aquisições e no surgimento de grandes empresas como Brasmotor, Climax e Prosdócimo. Historicamente, essas empresas buscaram parcerias com conglomerados estrangeiros como forma de acesso a inovações (CADAMURO, 2012).

Segundo Pimenta (2009), a década de 1980 foi marcada por transformações significativas para as empresas deste setor, principalmente em decorrência da abertura comercial promovida pelo governo Collor, que facilitou a entrada de produtos importados no mercado brasileiro. Multinacionais interessadas em consolidar sua presença nesse mercado firmaram joint-ventures ou adquiriram empresas nacionais. A nova configuração econômica, impulsionada pela globalização, levou à busca por novos mercados, com foco na América

Latina, Leste Europeu e Sudeste Asiático, que se tornaram os principais alvos de investimentos dessas multinacionais.

Martinez e Rachid (2005) apud Pimenta (2009), citam que a indústria de linha branca no Brasil passou por um processo significativo de internacionalização e concentração, em que as empresas de capital nacional foram gradualmente adquiridas por empresas estrangeiras. Esse movimento resultou em uma reestruturação das fábricas, que incluía a aquisição de novos equipamentos, a implementação de métodos de gestão mais modernos e a adoção de ferramentas voltadas para a qualidade, planejamento e controle da produção, bem como para a organização do trabalho em diversas áreas de gestão.

Conforme Cunha (2003), entre 1990 e 1992, o Brasil enfrentou uma contração econômica significativa, acompanhada por uma queda acentuada nas vendas industriais de produtos de linha branca. A recuperação econômica subsequente, particularmente após a implementação do Plano Real, resultou em altas taxas de crescimento anual no consumo de linha branca. Esse crescimento foi impulsionado pela estabilização da inflação e pela redução das taxas de juros, o que favoreceu (a) o aquecimento da demanda, (b) o aumento das vendas a prazo e (c) a mudança no perfil dos consumidores, com uma maior participação das classes de renda baixa.

Em 1995, o Brasil alcançou a quinta posição no comércio internacional de eletrodomésticos de linha branca. No ano seguinte, as principais empresas globais do setor, Whirlpool e Electrolux, assumiram a liderança no mercado brasileiro, ocupando respectivamente a primeira e a segunda posições em vendas no país (ROTTA, 2004).

A aquisição/fusão/associação das empresas nacionais e/ou unidades de negócio com grandes grupos estrangeiros ocasionou a reestruturação societária e administrativa das empresas que passaram a ser controladas por grandes fabricantes mundiais. Em 1999, quatro empresas líderes – Multibrás, Electrolux, BSH Continental e GE-Dako – controladas respectivamente pela Whirlpool (EUA), AB Electrolux (Suécia), Bosch-Siemens Hausgeräte (Alemanha) e General Electric (EUA) representavam 93,8% do total de faturamento dessa indústria no país (ARAÚJO et al., 2004 apud GITAHY, DA LUZ, 2008; CUNHA, 2003).

Esse processo de desnacionalização do setor veio acompanhado por mudanças significativas nas estratégias das principais empresas, dentre as quais destacam-se: intensificação da reestruturação produtiva das principais empresas do setor; adoção de técnicas de organização e gestão de empresa com objetivo de diminuir custos, reduzir pessoal, elevar a qualidade dos produtos, aumentar a flexibilidade, aperfeiçoar a relação com os fornecedores e melhorar o atendimento ao cliente (ARAÚJO et al., 2004 apud GITAHY, DA LUZ, 2008 INVERNIZZI, 2000).

Assim, as exigências das montadoras de Linha Branca em relação aos seus fornecedores resultaram na implantação de sistemas de gestão da qualidade, auditorias periódicas, redução do número de fornecedores e aumento da dependência entre montadoras e fornecedores. Dessa forma, a estratégia adotada pelos grandes grupos do segmento determina o processo produtivo de seus fornecedores, que dependem da demanda das montadoras (CADAMURO, 2012).

Segundo Borghi (2017), a crise econômica internacional afetou severamente a economia em crescimento do Brasil no final de 2008, com impactos mais acentuados no ano seguinte. Em resposta à recessão, o governo brasileiro adotou diversas políticas anticíclicas para manter os níveis de produção e emprego no país. Essas políticas foram implementadas em duas fases principais: a primeira em 2008/2009, como reação à crise global, e a segunda em 2011/2012, visando combater o baixo dinamismo interno e as adversidades do cenário internacional. Entre as medidas adotadas, uma das respostas mais imediatas foi a redução de tributos sobre diversos bens industrializados, beneficiando setores como o automobilístico, o da construção civil e o de eletrodomésticos da linha branca.

De acordo com Barni e Silva (2021) em resposta à crise econômica internacional, o Governo Federal implementou, a partir de 17 de abril de 2009, a primeira redução das alíquotas do IPI, com o objetivo de mitigar os impactos negativos na indústria, que havia registrado uma queda de 22,6% na produção no primeiro trimestre daquele ano. A medida também visava preservar empregos, uma vez que o setor industrial passou de 36.305 trabalhadores em outubro de 2008 para 34.478 em fevereiro de 2009.

O comércio de eletrodomésticos enfrentava forte concorrência de produtos importados, devido ao câmbio favorável. Para estimular o consumo e fortalecer a indústria nacional, o governo anunciou, em 1º de dezembro de 2011, a redução do IPI para eletrodomésticos da linha branca. As novas alíquotas foram estabelecidas da seguinte forma: fogões de 4% para 0%, geladeiras de 15% para 5%, máquinas de lavar de 20% para 10% e tanquinhos de 10% para 0%. Inicialmente, a medida seria válida até 31 de março de 2012, mas foi prorrogada sucessivamente. Em junho de 2013, o governo anunciou uma elevação gradual das alíquotas do IPI sobre a linha branca. Entre julho e setembro de 2013, a taxa incidente sobre fogões passou de 2% para 3%, sobre tanquinhos de 3,5% para 4,5%, sobre refrigeradores e geladeiras de 7,5% para 8,5%, enquanto as lavadoras permaneceram com a alíquota de 10% por tempo indeterminado (BARNI; SILVA, 2021).

Segundo dados do Custom Marketing Insights (2023), o mercado global de eletrodomésticos, avaliado em USD 673,2 bilhões, em 2024, apresenta uma perspectiva de crescimento significativa, projetando atingir USD 1.115,4 bilhões até 2033, com uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 5,5% no período. A crescente automação doméstica e a adoção de eletrodomésticos inteligentes também impulsionam a expansão do setor, proporcionando maior eficiência e comodidade aos consumidores.

De acordo com o Mordor Intelligence (2024), o mercado é segmentado da seguinte forma:

Eletrodomésticos de Grande Porte (*Major Appliances*)

- Refrigeradores
- Freezers
- Lava-louças
- Máquinas de lavar
- Fogões e fornos

Eletrodomésticos de Pequeno Porte (*Small Appliances*)

- Aspiradores de pó

- Pequenos eletrodomésticos de cozinha
- Cortadores de cabelo
- Ferros de passar roupa
- Torradeiras
- Grelhas e assadeiras
- Secadores de cabelo
- Outros pequenos eletrodomésticos

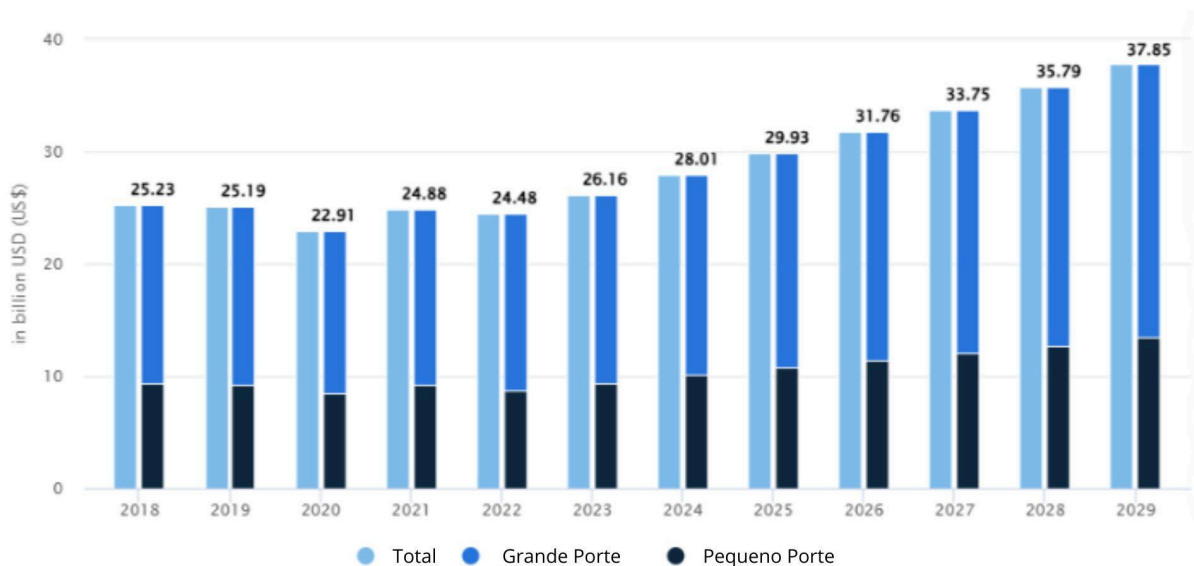
Dentre os segmentos do mercado, os refrigeradores se destacaram como os mais representativos, detendo 35% de participação em 2022 e mantendo essa liderança projetada até 2032. A demanda crescente por esses produtos está associada à necessidade de preservação de alimentos, à busca por maior eficiência energética e à integração com tecnologias inteligentes, permitindo controle remoto e monitoramento de temperatura. Além disso, mudanças nos hábitos de consumo, como a priorização da alimentação saudável e a redução do desperdício, impulsionam a adoção de modelos mais avançados e compactos, especialmente em áreas urbanas, onde os espaços são reduzidos (Custom Marketing Insights, 2023).

O crescimento do mercado de eletrodomésticos está diretamente relacionado ao aumento do poder de compra dos consumidores e à elevação da renda disponível. Com níveis de renda mais altos, os consumidores têm maior capacidade de adquirir eletrodomésticos de grande porte, como refrigeradores, lavadoras e lava-louças, que antes poderiam ter sido adiados por restrições financeiras. Além disso, a busca por um estilo de vida mais moderno incentiva a substituição de aparelhos antigos por modelos mais eficientes e tecnologicamente avançados, como os que oferecem recursos inteligentes e maior eficiência energética. Essa tendência é evidenciada por pesquisas que apontam um aumento nos gastos domésticos em 58% das famílias, indicando um movimento em direção a produtos de maior valor agregado, ainda que 79% dos consumidores mantenham cautela nos gastos discricionários. Assim, a segurança financeira impulsiona a demanda por eletrodomésticos, estimulando a inovação e a competitividade entre os fabricantes (Custom Marketing Insights, 2023).

Segundo dados do Morder Intelligence (2024), o mercado de eletrodomésticos no Brasil deve crescer a uma taxa composta anual (CAGR) superior a 3% no período projetado, impulsionado por fatores macroeconômicos e mudanças no comportamento do consumidor. O crescimento do PIB, que atingiu USD 2.001,36 bilhões em 2022, fortaleceu o poder de compra e expandiu o número de lares para 74,1 milhões, aumentando a base de consumidores. A classe média emergente impulsiona a demanda por eletrodomésticos premium e eficientes em energia, enquanto a digitalização do varejo transforma o processo de compra, com a penetração da internet alcançando 81,79% em 2023 e o comércio eletrônico crescendo rapidamente.

O mercado de eletrodomésticos no Brasil é liderado pelo segmento de grandes eletrodomésticos, que representa 72% da participação em 2024, impulsionado pelo crescimento urbano, aumento da renda e demanda por produtos energeticamente eficientes. A integração de tecnologia inteligente fortalece esse setor, especialmente na região Sudeste. Paralelamente, os eletrodomésticos de pequeno porte são a categoria de crescimento mais rápido, com uma projeção de 9% ao ano até 2029. A busca por praticidade, vida saudável e o aumento das vendas online impulsionam esse mercado, destacando produtos como airfryers e liquidificadores (Mordor Intelligence, 2024).

De acordo com dados do Statista (2024), em 2025, o mercado de eletrodomésticos no Brasil deverá gerar uma receita de US\$ 29,93 bilhões, com uma taxa de crescimento anual de 6,04% entre 2025 e 2029. O segmento de grandes eletrodomésticos será o maior, com um volume de US\$ 19,16 bilhões. O mercado de eletrodomésticos no Brasil também deverá alcançar um volume de 231,6 milhões de unidades até 2029, com um crescimento de 1,7% em 2026. A receita per capita será de US\$ 0,61 mil por domicílio em 2025, e a venda online deverá contribuir com 20,3% da receita total. Atualmente, o Brasil é o quarto maior mercado de eletrodomésticos do mundo com valor de US\$ 30 bilhões, a China é o líder com uma receita de US\$ 165 bilhões, seguido por Índia e Estados Unidos, avaliados em US\$ 64 bilhões. A Figura 1 representa o crescimento do valor de mercado atual e esperado.

Figura 1: Eletrodomésticos - Brasil

Fonte: Statista (2024).

Outro dado importante divulgado pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), coletado via pesquisa realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), é o número de domicílios que possuem geladeiras e máquinas de lavar. Vale destacar, que em 2022 havia mais domicílios com geladeira do que com energia elétrica. A Figura 2 mostra a evolução através dos anos:

Figura 2: Domicílios Particulares segundo suas Características

EXISTÊNCIA DE	2016		2017		2018		2019		2022	
	milhões ⁽²⁾	% ⁽²⁾	milhões ⁽²⁾	% ⁽²⁾	milhões ⁽²⁾	% ⁽²⁾	milhões ⁽²⁾	% ⁽²⁾	milhões ⁽²⁾	% ⁽²⁾
ILUMINAÇÃO ELÉTRICA	66,3	99	67,1	99	68,5	99	69,7	99	72,7	98
GELADEIRA	65,9	98	66,7	98	68,0	98	69,3	98	73,0	98
MÁQUINA DE LAVAR ROUPA	42,3	63	43,3	64	45,0	65	46,5	66	52,0	70
TOTAL DE DOMICÍLIOS	67,2	-	68,0	-	69,4	-	70,6	-	74,1	-

Fonte: ABINEE, dados coletados pelo IBGE (2022).

Por fim, a Tabela 2 abaixo é um recorte de uma base de dados fornecida pela ABINEE, a qual evidencia a quantidade de produção e venda de alguns dos principais produtos do segmento de linha branca.

Tabela 1 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e a descrição dos produtos - Brasil - 2022						
Classes de atividades e descrição dos produtos	Unidade de medida	Número de informações	Produção		Vendas	
			Quantidade	Valor (1 000 R\$)	Quantidade	Receita Líquida (1 000 R\$)
Fogões de cozinha elétricos ou não elétricos (inclusive cooktop), para uso doméstico; exceto churrasqueiras, braseiros, fornos e fogareiros não elétricos	mil	32	10 497	3 762 283	11 233	4 055 593
Fornos de micro-ondas	mil	9	1 827	784 148	2 797	898 816
Máquinas de lavar ou secar roupa para uso doméstico	mil	12	5 717	3 193 733	6 119	3 368 993
Máquinas de lavar louça para uso doméstico	unidade	1	(x)	(x)	(x)	(x)
Partes e peças para máquinas de lavar louça para uso doméstico	mil	4	(x)	(x)	(x)	(x)
Partes e peças para máquinas de lavar roupa para uso doméstico	unidade	16	61 039 276	220 272	58 983 841	217 313
Partes e peças para fogões de cozinha elétricos ou não elétricos, para uso doméstico	mil	23	809 018	262 627	794 852	253 457
Partes e peças para fornos de micro-ondas	mil	10	14 048	567 229	9 621	338 490
Partes e peças para refrigeradores ou congeladores (freezers) para uso doméstico	unidade	44	310 966 781	1 127 737	306 946 927	1 061 929
Refrigeradores ou congeladores (freezers), inclusive combinados, para uso doméstico	mil	10	6 055	7 482 438	6 311	7 558 909
Tanques elétricos para lavar roupas (tanquinho), para uso doméstico	unidade	7	2 441 691	748 054	2 450 030	750 195

Fonte: ABINEE (2022).

2.2 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

Após a Primeira Guerra Mundial, a indústria automobilística passou da produção artesanal para a produção em massa, introduzindo o Sistema Fordista. Henry Ford buscava a padronização de peças e matérias-primas, permitindo a intercambiabilidade de componentes,

o que resultou na padronização de projetos, na redução de falhas na linha de montagem e no aumento da qualidade dos produtos (WOMACK et al., 1992).

Posteriormente, após a Segunda Guerra Mundial, o Sistema Toyota de Produção foi desenvolvido para enfrentar os desafios da baixa produtividade da indústria japonesa. Os líderes Sakichi Toyoda, Kiichiro Toyoda e Taiichi Ohno focaram na eliminação de desperdícios e na busca por perfeição, visando aumentar a produção e melhorar a qualidade sem necessidade de correções ou inspeções adicionais (TAIICHI, 1988).

Ambos os sistemas surgiram como respostas aos fatores socioeconômicos da época, contribuindo significativamente para o desenvolvimento de produtos ao promover a padronização de projetos, a eliminação de desperdícios e o aumento da qualidade (PIMENTA, 2009).

Devido às rápidas mudanças tecnológicas, as empresas operam em diversos mercados que exigem inovação mais frequente, ciclos de vida de produtos mais curtos e produtos com alta qualidade e confiabilidade. Essas pressões geradas pela competição têm levado as organizações a introduzirem seus produtos no mercado com maior rapidez, menor custo e melhor qualidade (SALGADO et al., 2010). A competitividade está fortemente relacionada ao Desenvolvimento de Produtos (DP), embora não seja exclusivamente determinada pelo Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP).

O sucesso organizacional depende frequentemente do tempo e da consistência no lançamento de novos produtos. A literatura oferece diversas recomendações para melhorar o desempenho do DP (SALGADO et al., 2010). Um estudo de Stalk e Hout (1990) apud Salgado et al. (2010) demonstra que a velocidade de introdução de novos produtos está diretamente relacionada à posição de mercado, lucro e custos. Barnett e Clark (1998) destacam que produtos possuem uma vida útil e portanto precisam ser constantemente aperfeiçoados e desenvolvidos, buscando inovação para que a empresa se mantenha competitiva.

De acordo com Filippini, Salmaso e Tassarolo (2004), o desenvolvimento rápido de novos produtos tornou-se uma prioridade em muitas organizações que buscam comercializar tecnologias emergentes e atender às necessidades dos clientes. Nesse sentido, é evidente que um Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) eficaz é essencial para que as empresas possam competir com sucesso no mercado global. Além disso, há um número crescente de empresas que têm investido significativamente em iniciativas e recursos para desenvolver melhores práticas e avaliar os PDPs das líderes do setor (LIM, SHARKEY e HEINRICHS, 2003).

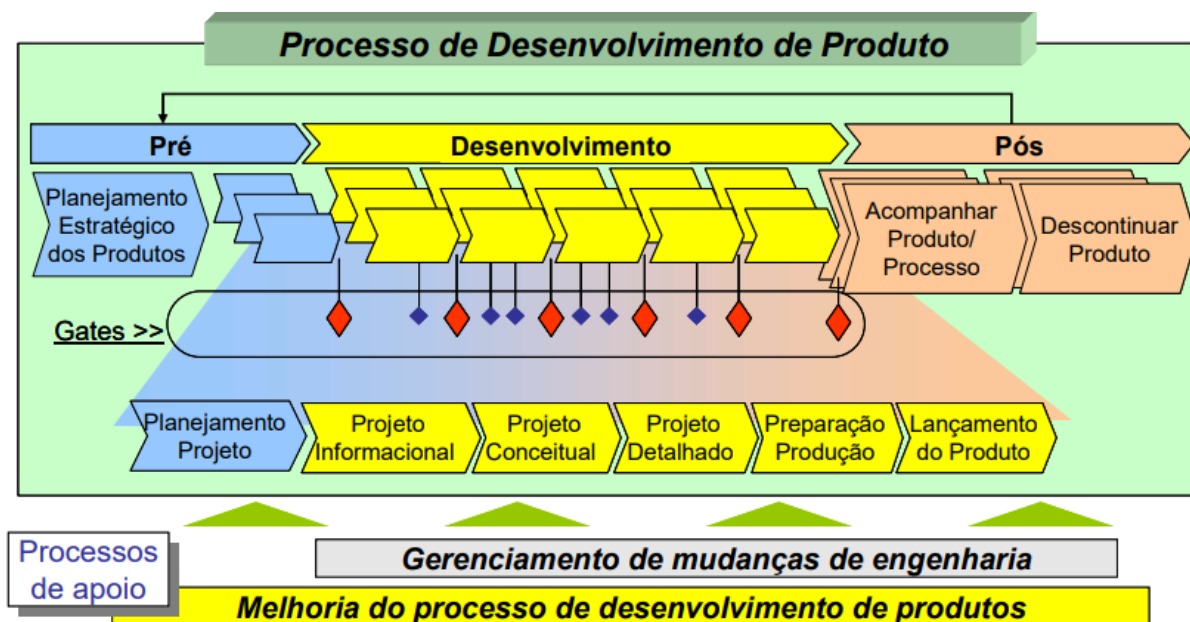
Segundo Machado e Toledo (2008), desenvolver um produto significa fazer com que uma ideia possa ser materializada na forma de um bem físico ou de um serviço a ser prestado. Dessa forma, o PDP compõe-se das atividades planejadas, coordenadas e controladas que visam fazer com que o objetivo de criação de um novo produto possa ser alcançado.

Conforme Toledo et al. (2006) apud Costa (2010), o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) é um conjunto de atividades que começa com a identificação e análise das necessidades do mercado, das possibilidades tecnológicas e dos recursos disponíveis, a fim de alinhar essas decisões ao planejamento estratégico da empresa. Este processo inclui a elaboração das especificações de projeto do produto e de seu processo de produção, e se encerra com o acompanhamento do produto no mercado após seu lançamento, além das atividades relacionadas à descontinuidade do produto no mercado. De forma geral, o PDP cobre todo o ciclo de vida do produto.

Como ilustrado na Figura 3, o Modelo Unificado proposto por Rozenfeld et al. (2006) é estruturado em três macrofases: Pré-Desenvolvimento, Desenvolvimento e Pós-Desenvolvimento. Este modelo é resultado da síntese de diversos estudos anteriores. De acordo com os autores, uma fase é caracterizada pela entrega de um conjunto de atividades que, ao serem concluídas, elevam o projeto a um novo estágio de desenvolvimento, considerando-se a fase satisfatória e aprovada. A avaliação dos resultados de uma fase ocorre por meio de uma revisão abrangente e detalhada, denominada *gate*, que analisa a qualidade dos resultados alcançados, a conformidade do projeto com o plano inicial, o impacto dos

problemas encontrados e a relevância do projeto em relação ao portfólio de produtos da empresa.

Figura 3 - Etapas do Processo de Desenvolvimento de Produto



Fonte: Rozenfeld et al., 2006.

Essas etapas têm como principais objetivos: (a) desenvolver um produto que atenda plenamente às expectativas do mercado em termos de qualidade total; (b) desenvolver o produto dentro de um prazo competitivo; e (c) desenvolver o produto a um custo que seja compatível com o mercado e com as estratégias da empresa.

Conforme Rozenfeld et al. (2006), a macrofase de pré-desenvolvimento envolve atividades cruciais para a definição do projeto de desenvolvimento, a partir das estratégias empresariais, considerando as limitações de recursos disponíveis, o conhecimento e as informações sobre os consumidores, além do levantamento de tendências tecnológicas e mercadológicas. Essa macrofase é composta por duas fases principais:

- a) **Planejamento Estratégico dos Produtos:** Essa fase é responsável por definir o portfólio de produtos que a empresa desenvolverá ou comercializará,

alinhando-se com a estratégia corporativa, além de considerar as restrições e as tendências do mercado e da tecnologia.

- b) **Planejamento do Projeto:** O objetivo desta fase é a elaboração de um plano detalhado do projeto, que inclui informações essenciais para sua execução, como a declaração do escopo do produto e do projeto, prazos, duração, orçamento, pessoal e recursos necessários, análise de riscos e indicadores de desempenho. Essa fase se inicia quando a data prevista para a realização de um dos projetos do Plano Estratégico dos Produtos se aproxima e termina quando um projeto específico, após ser planejado, é considerado viável e aprovado no *gate*, iniciando assim sua execução física.

Após a definição do portfólio e o planejamento dos projetos, a empresa entra na Macrofase de Desenvolvimento. Essa fase é crucial para o desenvolvimento dos protótipos, e segundo Rozenfeld et al. (2006) é composta pelas seguintes etapas:

- a) **Projeto Informacional:** Com base nas informações do pré-desenvolvimento, são estabelecidas as especificações-meta do produto, definindo as características técnicas necessárias para atender às necessidades do consumidor. Critérios de avaliação para as próximas fases também são determinados.
- b) **Projeto Conceitual:** Envolve a busca, criação, representação e seleção de informações. Essa fase começa com o benchmarking e a atualização das especificações-meta, e inclui a criação de soluções e representações do produto, que podem ser feitas manualmente ou com auxílio de ferramentas computacionais. O conceito do produto é definido, incluindo integração de princípios de solução, arquitetura, layout, estilo, entre outros.
- c) **Projeto Detalhado:** Nessa fase todas as especificações do produto ou processo são desenvolvidas e finalizadas, encontrando-se prontas para serem encaminhadas para a manufatura. Essa fase é essencial para garantir o sucesso do produto, pois detalha todas as especificações necessárias para o desenvolvimento do protótipo e avalia a capacidade de manufatura.

- d) **Preparação para Produção:** Consiste em iniciar a produção piloto (protótipo) e otimizar a produção, garantindo que os protótipos atendam aos requisitos previamente definidos. A homologação verifica se os protótipos cumprem todos os padrões industriais e se a empresa pode reproduzir o produto com qualidade consistente ao longo do ciclo de vida.
- e) **Lançamento do Produto:** Finalmente, o produto é introduzido no mercado, assegurando suporte ao cliente, assistência técnica e campanhas de marketing.

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), na macrofase de pós-desenvolvimento, a empresa busca atingir metas de desempenho relacionadas ao lucro e à participação no mercado. Isso envolve estabelecer metas mínimas para o desempenho do produto ao longo de seu ciclo de vida e avaliar a continuidade do produto com base em seu desempenho. A fase é dividida em duas partes principais:

- a) **Acompanhamento do Produto e Processo:** Foca no monitoramento do produto na produção e no mercado, assim, identifica as oportunidades de melhoria e assegura que a retirada do produto não cause impactos negativos significativos. Inclui a realização de auditoria pós-projeto para avaliar a satisfação do cliente, o desempenho do produto, produção, assistência técnica, aspectos ambientais e lições aprendidas para futuros projetos.
- b) **Descontinuidade do Produto:** Envolve a decisão e o planejamento para a retirada do produto do mercado, garantindo que o processo seja feito de forma suave e com mínimo impacto.

Os principais resultados dessa fase incluem a detecção da satisfação do cliente, o monitoramento do desempenho do produto, a síntese das lições aprendidas e as solicitações de descontinuidade do produto.

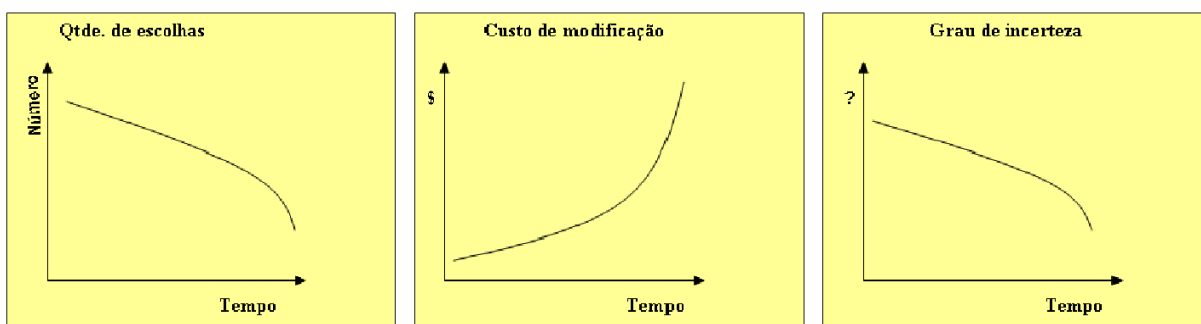
Ao longo dos anos, a gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) evoluiu em consonância com os modelos gerais de gestão adotados pelas empresas, buscando constantemente resolver os problemas enfrentados nesse processo. Conforme Rozenfeld et al. (2006), várias abordagens se destacam na gestão do PDP:

- **Abordagem Sequencial:** As informações sobre o produto são definidas em uma sequência lógica e passadas de uma área funcional para outra, sem integração significativa entre áreas e com procedimentos de gerenciamento informais.
- **Metodologia de Projeto:** Foca na busca pela excelência dentro de cada departamento, procurando a melhor sequência de etapas para desenvolver um produto. No entanto, não há uma visão compartilhada do ciclo de vida do produto.
- **Engenharia Simultânea:** Promove a integração de clientes, fornecedores e áreas funcionais da empresa no desenvolvimento do produto. Enfatiza o uso de ferramentas sistemáticas de projeto e o gerenciamento integrado de informações, permitindo a realização antecipada ou simultânea de atividades tradicionalmente sequenciais.
- **Funil de Desenvolvimento:** Prioriza o desenvolvimento de produtos com maior probabilidade de sucesso no mercado, por meio de um processo de negócios disciplinado.
- **Stage-Gates:** Avalia todos os projetos em andamento na empresa para garantir desempenho e qualidade no desenvolvimento.
- **Desenvolvimento Lean:** Incorpora princípios do desenvolvimento integrado de produtos, com valorização dos times, foco em prototipagem e teste, e redução de tempo em decisões de detalhes específicos. Baseia-se no sistema Toyota de desenvolvimento de produtos.
- **Design for Six Sigma:** Foca na integração dos requisitos dos clientes com especificações e tolerâncias do produto, utilizando ferramentas estatísticas e de simulação para reduzir vulnerabilidades do projeto.
- **Modelos de Maturidade:** Enfatiza a implantação e a melhoria contínua dos processos de desenvolvimento, oferecendo níveis de maturidade em termos da adoção de práticas e indicadores.
- **Gerenciamento do Ciclo de Vida dos Produtos:** Prevê a integração completa de dados e atividades ao longo de todo o ciclo de vida do produto, coordenando os projetos de forma mais sistemática e disciplinada, com maior agilidade na tomada de decisões.

Segundo Toledo et al. (2006), o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) está repleto de incertezas e riscos, tanto em suas atividades quanto em seus resultados. Essas incertezas e riscos decorrem da falta de informações completas sobre os requisitos de mercado e as exigências legais, bem como das dificuldades em resolver problemas técnicos e antecipar as consequências das decisões tomadas. Além disso, cada projeto é único, apresentando desafios, dificuldades e históricos específicos, o que contribui para a complexidade do processo.

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), a tomada de decisões acertadas no início do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) é crucial devido ao aumento significativo dos custos associados à modificação de decisões de projeto já implementadas ao longo do processo. Isso ocorre porque, ao alterar uma decisão, várias outras já estabelecidas podem ser invalidadas, exigindo a revisão de determinadas partes ou até mesmo do projeto básico do produto. Tal situação resulta em um maior consumo de tempo e recursos, o que torna fundamental a precisão das decisões nas fases iniciais do PDP. Essa dinâmica pode ser melhor compreendida por meio de uma visualização gráfica da relação entre o custo e a etapa do processo, ilustrada na Figura 4.

Figura 4 - Relação entre quantidade de escolhas custo de modificação e grau de incerteza com o passar do tempo no PDP



Fonte: Prasad (1996)

De acordo com Araújo (2017), os protótipos são versões preliminares de novos produtos, essenciais nas fases de Projeto Detalhado e Preparação para Produção, em que diversos testes são realizados para garantir a manufaturabilidade em larga escala. Os

protótipos podem ser físicos, tangíveis ou virtuais, criados por meio de recursos computacionais, sendo ambos cruciais para identificar problemas e aprimorar o produto antes de sua fabricação em massa.

A prototipagem, conforme enfatizado por Araújo (2017), facilita a identificação e análise de falhas nos produtos, sendo um processo vital para a comunicação entre equipes e a experimentação de soluções. Embora existam desafios para desenvolver protótipos de forma eficiente, como conflitos entre diferentes departamentos, a utilização adequada dos protótipos pode levar ao sucesso no desenvolvimento de novos produtos.

2.3 CONFIABILIDADE

Atualmente, as indústrias enfrentam expectativas cada vez mais elevadas em relação à qualidade e confiabilidade dos produtos, ao mesmo tempo em que lidam com restrições de custo e a pressão por ciclos de desenvolvimento mais curtos. A confiabilidade tornou-se um elemento crucial no desenvolvimento de produtos, a ponto de ser considerada obrigatória para se manter competitivo no mercado futuro (BRAGLIA et al., 2006 apud FERNANDES, 2010). Com isso, a verificação e validação de produtos, que garantem o cumprimento dos requisitos de confiabilidade, têm se tornado cada vez mais essenciais.

Conforme Pizzolato, Caten e Fogliatto (2005), para que as empresas industriais mantenham seus produtos no mercado com os níveis de qualidade exigidos, é essencial utilizar ferramentas eficazes para o desenvolvimento e otimização desses produtos. Um dos fatores determinantes para a escolha do consumidor é o prazo de garantia do produto, que pode ser estimado através das ferramentas da Engenharia da Confiabilidade. Fogliatto e Ribeiro (2009) explicam que a confiabilidade está associada ao funcionamento bem-sucedido de um produto ou sistema, sem falhas ou quebras. Nesse contexto, a confiabilidade de um sistema é definida como a probabilidade de que ele opere, dentro de condições ambientais específicas, com desempenho desejado durante um intervalo de tempo determinado (PIAZZA, 2000).

De acordo com a norma ABNT NBR 5462:1994, a confiabilidade é definida como a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um determinado intervalo de tempo. Essa ferramenta é fundamental para determinar o tempo até a falha dos produtos e para aprimorar a prevenção contra mecanismos de falhas. A confiabilidade é essencial, pois os consumidores esperam que os produtos funcionem conforme anunciado pelo fabricante. Falhas resultam em insatisfação dos consumidores e aumentam os custos devido a modificações de projetos, processos de fabricação, reparos e elevação dos custos de garantia (DROGUETT; MOSLEH, 2006 apud PASOLINI; TOMASI; VIDOR, 2019).

Produtos concorrentes no mercado frequentemente apresentam características e funções similares, tornando difícil a escolha do consumidor. Nessas situações, fatores pós-venda, como disponibilidade de peças, custo, serviço e manutenção, podem ser decisivos na escolha do produto (MURTHY, 2006). Um elemento crucial no pós-venda é a garantia oferecida ao cliente. A garantia deve ser claramente explicada no momento da compra, pois é um contrato no qual o fabricante ou fornecedor se compromete a oferecer assistência caso o produto falhe ou o serviço não atenda às expectativas do consumidor (ELSAYED, 1996; DOS SANTOS, 2008).

As garantias funcionam como um indicativo de desempenho e confiabilidade de um produto, influenciando diretamente os custos do fabricante. Um período de garantia prolongado pode aumentar os custos, a menos que o produto tenha uma qualidade superior. Portanto, se um fabricante oferece uma garantia mais extensa do que a de um concorrente, a confiabilidade do produto deve ser maior para minimizar os custos associados ao uso da garantia (MURTHY, 2006).

A busca por confiabilidade faz com que a verificação e validação no processo de desenvolvimento sejam cruciais. Programas eficazes de verificação e validação são necessários para garantir que os novos projetos atendam aos padrões de confiabilidade esperados (YADAV et al., 2006). Durante o desenvolvimento, os produtos são submetidos a testes de confiabilidade, que, ao contrário dos testes de qualidade tradicionais, exigem mais tempo e são frequentemente destrutivos (MADU, 1999).

Segundo Dodson (1999) e O'Connor (1995), há diversas atividades que podem ser realizadas ao longo das fases do Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) para assegurar a confiabilidade do produto. Quando essas atividades são adaptadas ao modelo de PDP proposto por Rozenfeld (2006), elas fornecem um guia estruturado para integrar a confiabilidade ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento do produto.

Figura 5 - Atividades a serem realizadas durante as fases do PDP para que a confiabilidade do produto seja atingida

Fases PDP					
1	2	3	4	5	6
Planejamento do Projeto	Projeto Informacional	Projeto Conceitual	Projeto Detalhado	Preparação Produção	Lançamento do Produto
Estabelecer linhas de produto da empresa e estratégias de verificação e validação	Estabelecer Riscos de confiabilidade e funcionalidade	Atualização dos riscos de confiabilidade e funcionalidade		Finalizar atividades de riscos de confiabilidade e funcionalidade	Arquivar Resultados e Procedimentos de Verificação e validação
	Desenvolver Planos de Verificação e Validação	Executar planos de verificação e validação		Completar planos de verificação e validação	
	Desenvolver planos de confiabilidade	Executar planos de confiabilidade		Completar planos de confiabilidade	

Fonte: Fernandes, (2010)

Conforme o desenvolvimento de um produto avança, é possível que alguns requisitos de confiabilidade estabelecidos inicialmente não sejam atingidos. Para solucionar esse problema, podem ser implementadas melhorias na confiabilidade por meio de alterações no projeto, que podem variar em impacto. Geralmente, um novo projeto apresenta uma confiabilidade inicial baixa, que melhora com o tempo. O processo de testes de confiabilidade deve ser repetido até que as metas desejadas sejam alcançadas (DODSON, 1999; VOLLERT, 1996).

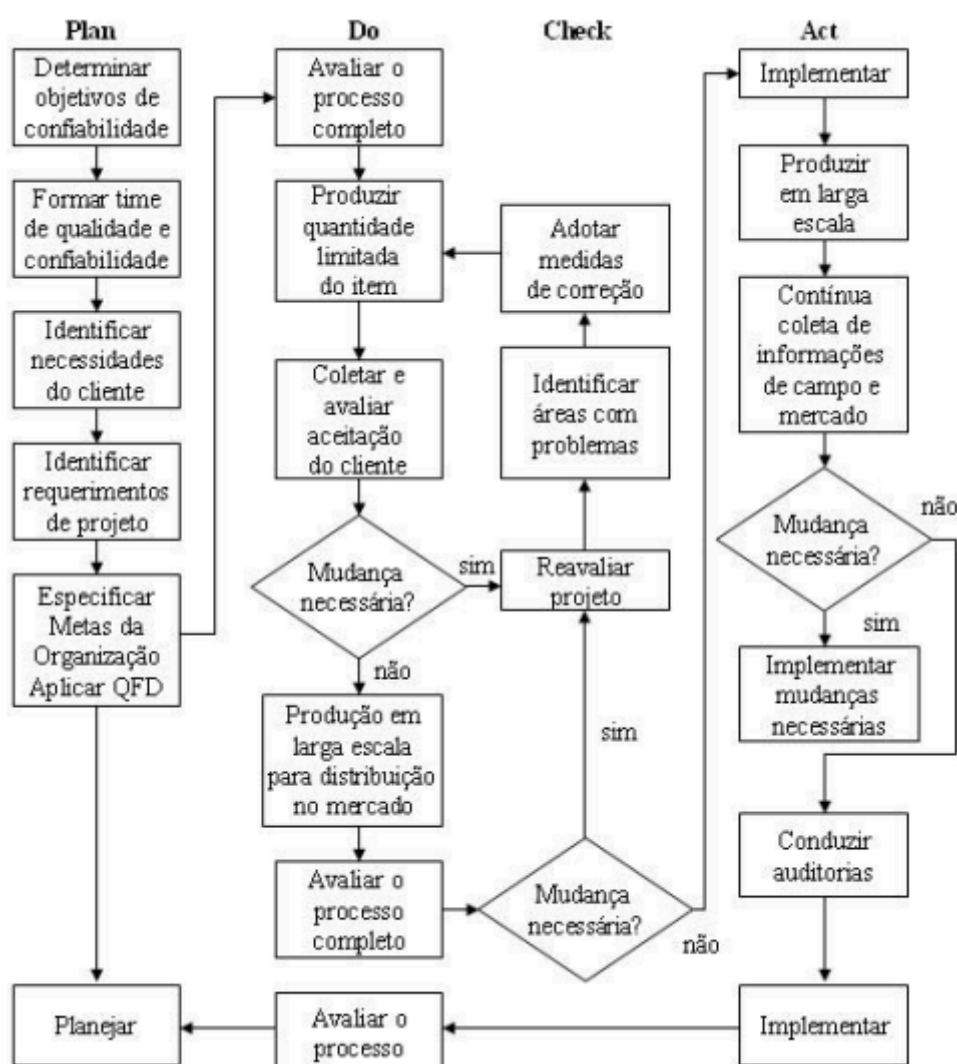
Os testes de confiabilidade precisam atender a três demandas principais (Saskia et al., 1998): detectar erros de projeto o mais cedo possível, permitindo mudanças de menor custo; identificar os pontos fracos do novo projeto, possibilitando uma resposta pró-ativa aos erros; e simular as condições de carregamento que a máquina enfrentará no mercado, prevenindo falhas durante a operação. Apesar da importância dos testes de confiabilidade, o principal desafio é determinar tarefas que estimem a confiabilidade de componentes ou sistemas, focando em avaliar todos os pontos críticos do produto (DODSON, 1999).

As atividades de confiabilidade nas fases de projeto conceitual e projeto detalhado têm como objetivo avaliar o projeto conforme o plano de verificação e validação estabelecido. Durante a fase de projeto conceitual do Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP), as atividades devem se concentrar principalmente em análises e testes de laboratório, com o intuito de minimizar a necessidade de testes em campo. A meta principal é identificar e mitigar os modos de falha por meio dessas análises e testes laboratoriais (SASKIA ET AL., 1998; DODSON, 1999; O'CONNOR, 1995).

Na fase de projeto detalhado, a concepção do produto é detalhada e transformada nas especificações finais. Documentações relacionadas a protótipo funcional, projeto dos recursos, dispositivos e ferramentas são gerados. O protótipo é aprovado, o produto pode ser homologado e as especificações finais são fixadas (ROZENFELD, 2006).

Para desenvolver um plano de testes eficaz, Saskia et al. (1998) sugerem considerar três dimensões: a estrutura física do produto, o tempo de serviço para verificar o comportamento dos danos, e os requisitos funcionais do produto. Essas dimensões ajudam a formular um plano de confiabilidade robusto, que gerencia a efetividade do programa por meio de um entendimento claro e da execução adequada de suas tarefas. Isso garante que os procedimentos de implantação e controle das tarefas de confiabilidade sejam apropriados, alinhando-se com o ciclo PDCA, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 - Ciclo PDCA para atividades de confiabilidade



Fonte: Madu, (1999)

As revisões formais e a avaliação dos requisitos de confiabilidade do produto devem ser realizadas periodicamente ao longo do programa. Essas revisões devem ocorrer pelo menos duas vezes por mês, embora esse intervalo possa ser ajustado conforme o andamento do programa. Durante essas discussões, é essencial abordar análises de confiabilidade, análise de falhas, cronograma e progresso dos testes, problemas relacionados ao programa de confiabilidade do fornecedor, além da avaliação de eventuais problemas no projeto ou na manufatura dos itens (DODSON, 1999; O'CONNOR, 1995).

Kececioglu (2002) apresenta uma definição tradicional de confiabilidade como a probabilidade condicional, com um dado nível de confiança, de que um sistema executará suas funções de maneira satisfatória ou sem falhas, isto é, dentro dos limites de desempenho especificados, em uma certa idade, por um período de tempo determinado, ou pelo tempo de missão. Essa confiabilidade é avaliada quando o sistema é utilizado da maneira e com o objetivo para o qual foi projetado, operando sob as condições ambientais de aplicação e contexto operacionais com um certo nível de estresse associado.

A confiabilidade de um produto desempenha um papel significativo na competitividade de uma empresa. Os departamentos de pesquisa e desenvolvimento concentram esforços para determinar a confiabilidade dos produtos, tanto para novos produtos quanto para aqueles já em produção. Nos estudos de confiabilidade, são identificadas as causas de falha de determinados componentes ou conjuntos, realizando-se análises dos conceitos de projeto, das matérias-primas e dos métodos de manufatura, a fim de obter dados que reflitam a situação atual do produto avaliado. Após a definição da proposta de projeto para melhorar a confiabilidade de um produto específico, é necessária a validação dessa proposta antes de sua implementação na linha de produção, evitando que problemas com o produto sejam identificados pelos clientes (NELSON, 2004 apud FERNANDES, 2010).

O desenvolvimento de produtos com alta confiabilidade em prazos curtos tem incentivado o uso de experimentos planejados. Essa abordagem está alinhada com as modernas filosofias de produção, que visam alcançar alta confiabilidade através da melhoria do projeto e do processo de manufatura, evitando a utilização excessiva de tempo e recursos em inspeções ou exames minuciosos que prolongam o tempo total de desenvolvimento (MEEKER; ESCOBAR, 2006). Muitos produtos, que geralmente têm vida longa, demandam um tempo extenso para testes de validação, o que pode inviabilizar testes nas condições de aplicação recomendadas. No entanto, é possível testar muitos produtos em condições mais severas de aplicação, para que as falhas ocorram em um intervalo de tempo menor (NELSON, 2004 apud FERNANDES, 2010). Testes em condições mais severas são conhecidos como testes acelerados (FREITAS; COLOSIMO, 1997 apud SALGADO, 2008).

O objetivo dos testes acelerados é obter informações sobre a confiabilidade de maneira mais rápida, submetendo componentes, subsistemas ou sistemas inteiros a níveis superiores ao normal de uma ou mais variáveis, como tensão e temperatura. Os resultados desses testes são utilizados para prever a vida útil das unidades nas condições normais de uso (MEEKER; ESCOBAR, 2006). Para validar essas informações, é necessário compreender a relação entre o mecanismo causador das falhas e as condições ambientais, representadas por uma ou mais variáveis de estresse (FERNANDES, 2010).

A teoria de testes acelerados envolve conceitos como falha e tipos de censura, além de conceitos específicos para esse tipo de teste. De acordo com os tipos de dados coletados nos testes, eles podem ser classificados em: (i) testes de vida acelerado, cujo dado é o tempo-até-falha, que pode ser completo ou censurado, dependendo da natureza e das limitações do teste; (ii) teste de degradação acelerado, quando a resposta é uma medida de desempenho do produto ou componente, como resistência à tração ou oxidação, medidas ao longo do tempo (FERNANDES, 2010; FREITAS; COLOSIMO, 1997 apud SALGADO, 2008).

2.4 METODOLOGIAS DE TESTES ACELERADOS (HALT)

Nelson (1990), Collins et al. (2013), Meeker and Escobar (1993), Freels et al. (2015) exploram que os testes acelerados, em geral, podem ser organizados em três categorias básicas: testes de vida acelerada (ALT) e testes de degradação acelerada (ADT), ambos quantitativos, e testes de vida altamente acelerada (HALT). Todos eles utilizam fatores de estresse, como temperatura, pressão, radiação, voltagem, taxa de uso, entre outros, para acelerar o processo de envelhecimento ou falha. No ALT, o estresse é usado para acelerar a falha de um componente ou dispositivo. No ADT, o estresse é utilizado para acelerar uma mudança específica na propriedade de um material, como densidade, tenacidade à fratura, porosidade, entre outras. Ambos são técnicas quantitativas, onde os componentes são submetidos a estresses fora de sua faixa normal de serviço e um modelo de vida acelerada é usado para relacionar o tempo de falha acelerada com o tempo de falha em "uso normal". Um modelo estatístico descreve o efeito do fator de aceleração, permitindo a estimativa ou previsão da confiabilidade com menos tempo de teste. Em contraste, o HALT é um processo

qualitativo e geralmente é considerado inadequado para estimativas quantitativas de confiabilidade. No HALT, os estresses são aumentados sequencialmente até a falha. O objetivo principal do HALT é forçar essas falhas e, em seguida, redesenhar o produto para corrigir as falhas identificadas.

De acordo com Cooper (2017) o processo HALT (Highly Accelerated Life Test) é utilizado de forma otimizada durante a fase de protótipo de engenharia para auxiliar no processo de robustecimento do produto. Ele é, essencialmente, uma ferramenta para melhorar a confiabilidade do produto. Durante o processo HALT, amostras do produto são submetidas a níveis crescentes de estresse ambiental, como temperaturas extremas, ciclos térmicos e vibrações, para revelar as fraquezas e limitações do produto. A chave para a melhoria da confiabilidade do produto é a análise de falhas e a ação corretiva em resposta aos modos de falha identificados.

Segundo Collins et al. (2013) o HALT é um processo cujo objetivo é criar um produto robusto (ou seja, com baixa probabilidade de falha durante sua vida útil e uma vida mais longa antes de falhas por desgaste), identificando fraquezas no design inicial. Essas fraquezas são exploradas ao expor os itens a níveis crescentes de estresse, como vibração, umidade, ciclos de energia, entre outros. Geralmente, esses níveis de estresse estão muito acima do que o item normalmente enfrentaria em uso cotidiano. À medida que os itens falham, os designers examinam cada um, determinam a causa raiz da falha e corrigem o item, seja alterando o design ou substituindo por um componente mais robusto. O processo HALT é então repetido no mesmo item, idealmente resultando em um produto capaz de suportar maiores estresses.

Hobbs (2000) apud Collins et al. (2013) descreve uma “receita” geral para a aplicação do HALT:

1. Identificar os fatores de estresse relevantes.
2. Aplicar níveis mais altos de um dos estresses no item, enquanto os outros fatores de estresse são mantidos constantes.
3. Continuar a aumentar o estresse até que o item falhe completamente ou não funcione corretamente.

4. Corrigir o item completamente ou temporariamente. Após isso, continuar a aumentar o estresse.
5. Continuar os passos 3-4 até que um nível especificado de estresse seja excedido.
6. Repetir os passos 2-5 com um novo estresse, mantendo os outros fatores constantes.

Em algumas situações, é recomendável que os níveis de dois estresses sejam aumentados simultaneamente, caso haja uma possível interação entre os fatores de estresse.

Para que o HALT funcione, é essencial que as falhas no produto sejam detectáveis. Chrusciel (2013) descreve um processo de alto nível para detecção no HALT utilizado pela Subzero, uma empresa de refrigeração. Os primeiros cinco desses passos foram originalmente definidos por Hobbs (2000) e combinam os passos 1 a 3 em uma etapa chamada precipitação; o processo, então, define uma etapa separada de detecção antes de realizar a análise de falhas e ações corretivas, conforme os passos 4 a 5. A seguinte descrição do processo de detecção HALT considera uma junta de solda defeituosa como exemplo:

1. **Precipitação:** Precipitação refere-se a transformar um defeito que é latente ou indetectável em um que seja detectável. A junta de solda defeituosa provavelmente não é detectável eletricamente quando latente, a menos que seja extremamente defeituosa. O processo de precipitação utilizará estresses como vibração combinada com ciclos térmicos para manifestar a falha. Este é o primeiro passo do processo HALT.
2. **Detecção:** A precipitação torna a falha detectável, mas ainda é necessário detectá-la, o que exige que a configuração do teste seja devidamente instrumentada.
3. **Análise de falha:** Este é o passo difícil de determinar por que a falha ocorreu. No caso da junta de solda, é necessário entender por que a junta falhou. A falha na junta pode ser devido a um defeito de design, causando um estresse extremo na junta devido à vibração. Se decidirmos que a junta de solda estava

defeituosa, precisamos entender como e por que ela estava defeituosa para avançar para a próxima etapa.

4. **Ação corretiva:** No HALT, a ação corretiva refere-se a mudanças no design, componente ou processo, de modo que a falha não ocorra novamente no futuro. A ação corretiva é o principal objetivo de realizar o HALT, e a análise de falha é um pré-requisito crucial. No caso da junta de solda, a ação corretiva pode ser mudar a fixação da placa de circuito para mitigar a vibração ou alterar o processo de soldagem para criar uma ligação mais forte.
5. **Verificação:** A verificação é a determinação de que a ação corretiva foi bem-sucedida e que a falha que causou o problema não está mais presente. A correção pode ser ineficaz ou pode haver outros problemas causando a anomalia que ainda não foram corrigidos. Além disso, outra falha pode ser induzida por operações no produto. Isso exige a repetição das condições que criaram a falha. O método usual de testar uma correção durante a etapa HALT é realizar o HALT novamente e determinar se o produto é pelo menos tão robusto quanto antes, e idealmente um pouco melhor. Se a falha for corrigida corretamente, então a mesma falha não deve ocorrer novamente.
6. **Banco de dados:** As lições aprendidas devem ser registradas em um banco de dados, do qual se pode extrair conhecimento valioso sempre que um evento semelhante ocorrer novamente. Isso também se torna um repositório valioso de conhecimento de engenharia que pode ser aplicado ao desenvolvimento de produtos futuros.

Os defensores afirmam que as empresas que praticam o HALT "corretamente" e mantêm um banco de dados bem organizado tornam-se adeptas a projetar e construir produtos muito robustos com alta confiabilidade (CHRUSCIEL, 2013).

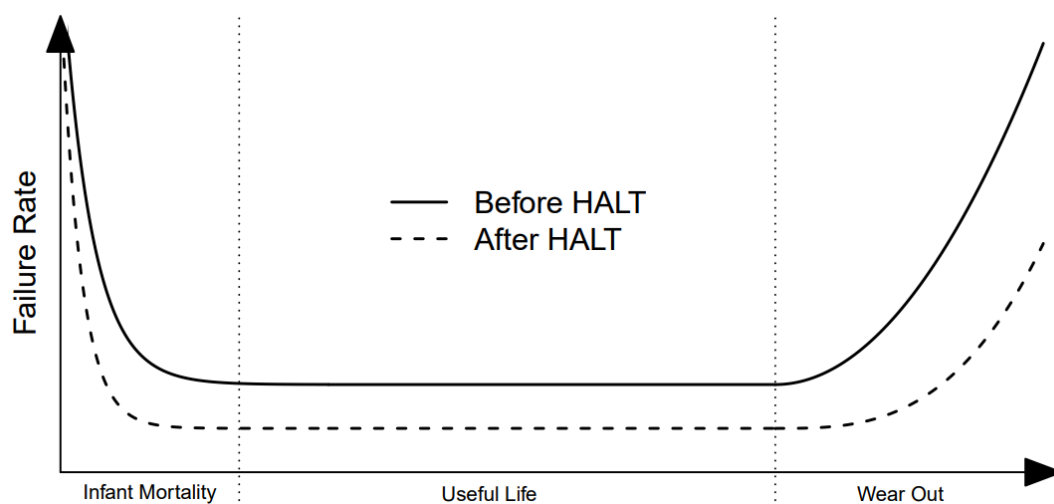
De acordo com Collins et al., (2024), quando ocorre uma falha ou uma medida de desempenho não é possível trazer de volta dentro dos limites de especificação através da redução do estresse, é necessária uma ação corretiva para eliminar a fraqueza do design e alterar a arquitetura do sistema. O sistema melhorado deve suportar níveis mais altos de

estresse antes de falhar. Esse processo de testar-corriger-testar continua iterativamente à medida que novos designs são submetidos a estresses até o limite de destruição, refletindo as restrições físicas ou químicas na unidade (por exemplo, derretimento, ruptura dielétrica). Esse limite fundamental da tecnologia (FLT) é o ponto em que a ação corretiva exige uma mudança de design proibitivamente cara.

A Figura 6 mostra uma visão conceitual dos limites operacionais e de destruição em comparação com as especificações do produto em "uso normal", e como esses limites são (idealmente) ampliados pelo processo HALT. Note que indicamos na figura que esses limites têm variação estocástica, mas o HALT não tenta quantificar essa variabilidade. O teste é concluído no limite fundamental e o design é considerado finalizado (Collins et al., 2024).

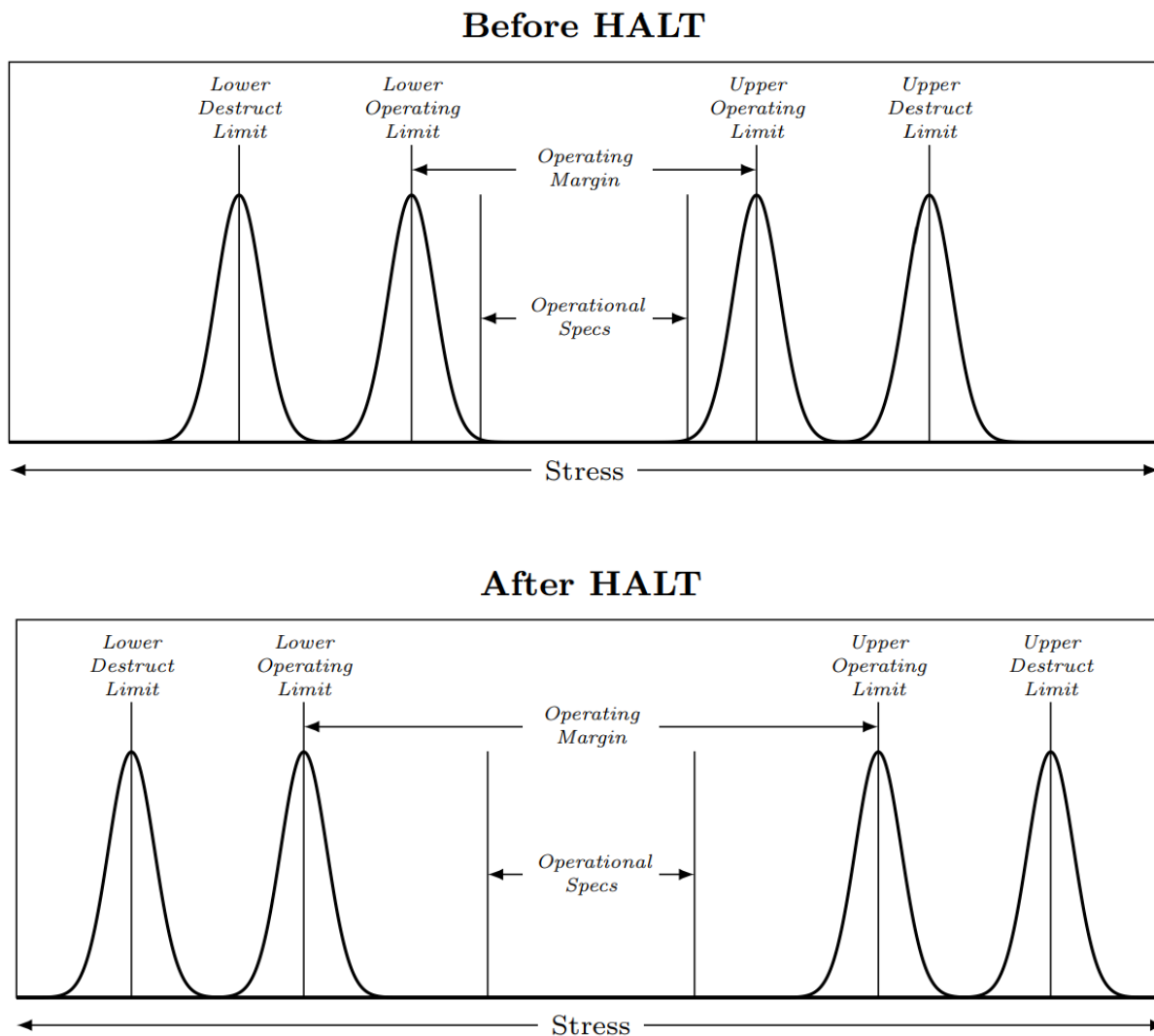
Um processo HALT bem-sucedido terá reduzido a mortalidade infantil do produto e as probabilidades de falhas aleatórias, além de criar um período de vida útil mais longo até o desgaste, como ilustrado pela "curva da banheira" na Figura 7 (Collins et al., 2024).

Figura 7 - A função de risco prototípica (taxa de falha) antes e depois do HALT.



Fonte: Collins et al., (2024)

Figura 8 - Uma representação visual das margens operacionais em expansão devido ao HALT



Fonte: Collins et al., (2024)

Historicamente, a prática do HALT tem sido predominantemente aplicada a eletrônicos (Hobbs, 2000; McLean, 2009; Gray e Paschkewitz, 2016). Em grande parte, isso se deve à facilidade de monitorar componentes e sistemas eletrônicos: ao conectar sensores externos em pontos de teste, parâmetros como resistência, voltagem, corrente e frequência podem ser monitorados continuamente para detectar falhas. Ao correlacionar essas medições

com perfis térmicos e de vibração, os níveis de estresse que precipitam falhas podem ser determinados.

O monitoramento contínuo também é possível em outras aplicações. Na testagem de tubulações e vasos de pressão, vazamentos ou rompimentos podem ser detectados com base na medição de pressão; o comprimento de trincas tem sido monitorado continuamente em amostras metálicas submetidas a tensões de flexão repetitivas; bem como de sinais acústicos e de vibração pode detectar desgaste em componentes rotativos (COLLINS et al., 2024).

Um exemplo de uso do HALT na indústria de linha branca é a falha de máquinas rotativas que pode ser acelerada de várias maneiras. Uma técnica óbvia é a aceleração da taxa de uso, uma máquina de lavar que normalmente é utilizada algumas vezes por semana pode ser operada várias vezes por dia (YANG; ZAGHATI, 2006). A maioria dos métodos de detecção de falhas primeiro aplica vários tipos de processamento de sinal para separar sinais relevantes do ruído e, em seguida, utiliza técnicas como análise de componentes principais (PCA) ou análise discriminante linear (LDA) para classificar os sinais em "normais" ou "anômalos", sendo estes últimos indicativos de desgaste excessivo ou falha (COLLINS et al., 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho adota uma abordagem exploratória e descritiva para analisar a aplicação da metodologia HALT (Highly Accelerated Life Test) na indústria de linha branca. A pesquisa é de natureza qualitativa, com foco na compreensão aprofundada das práticas, benefícios e desafios associados à implementação da HALT no contexto da engenharia. A análise busca oferecer uma visão detalhada das implicações da metodologia para a robustez e confiabilidade dos produtos, explorando como a HALT contribui para o desenvolvimento de produtos mais duráveis e eficientes, bem como sua influência financeira e de posicionamento no mercado.

A estratégia de busca foi conduzida utilizando diversas bases de dados acadêmicas e plataformas especializadas para garantir uma abrangência adequada na coleta de literatura relevante. As principais bases de dados utilizadas incluíram Google Acadêmico, Scopus e ScienceDirect, que oferecem acesso a uma ampla gama de publicações científicas e técnicas. A busca foi realizada com a utilização de termos e palavras-chave específicas, como "HALT", "Highly Accelerated Life Test", "indústria de linha branca", "confiabilidade" e "desenvolvimento de produto" combinados com operadores booleanos para refinar os resultados e filtrar as publicações mais pertinentes.

O processo de análise envolveu uma leitura crítica e sistemática das fontes selecionadas. Cada documento foi avaliado quanto à sua relevância para os objetivos da revisão, e os principais achados foram extraídos e sintetizados. A síntese dos resultados foi apresentada de forma a destacar as principais tendências e conclusões sobre a aplicação da HALT, oferecendo uma visão abrangente sobre como essa metodologia contribui para o desenvolvimento e a confiabilidade dos produtos na indústria de linha branca.

Foi conduzido um estudo de caso para evidenciar uma possível aplicação do uso da metodologia HALT dentro do desenvolvimento de produtos em uma indústria de linha branca. Dessa forma o seguinte procedimento foi estabelecido:

Seleção de Amostras:

- Foram escolhidas X amostras representativas do componente A da empresa R, assegurando diversidade suficiente para refletir a variabilidade da produção.

Definição dos Critérios de Avaliação:

- Comparação com os requisitos mínimos estabelecidos para o componente A.
- Resistência a condições ambientais extremas (temperatura, vibração, umidade).
- Quantificação do nível de estresse necessário para replicar o ciclo de vida real do componente.

Execução do Teste HALT:

- As amostras foram submetidas a um teste de vida acelerado seguindo um procedimento padrão, até a ocorrência de falhas ou até a validação do desempenho esperado.
- Foi analisado o fator de fadiga do material, que consiste na determinação da vida útil com base no número de ciclos até a falha.

4. DISCUSSÃO

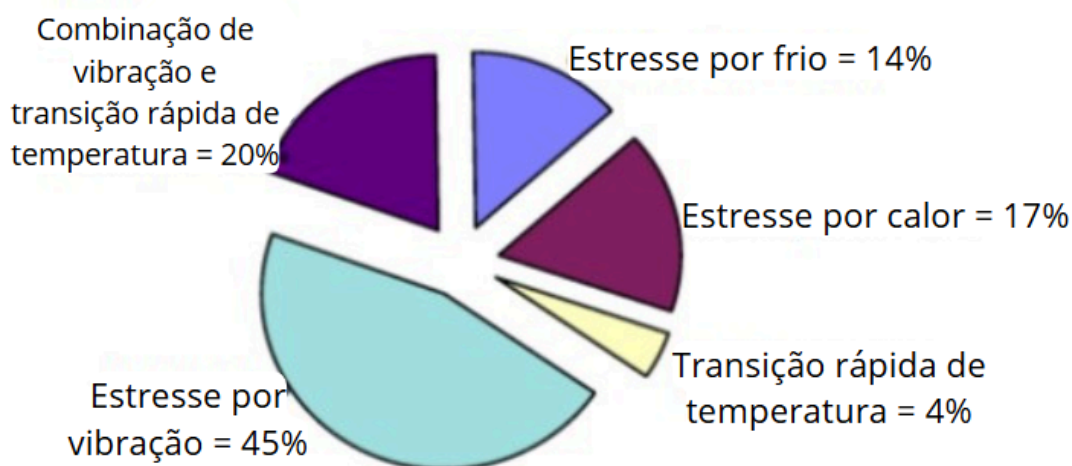
A introdução de um produto complexo geralmente requer um longo processo de desenvolvimento, durante o qual se espera que a confiabilidade do produto melhore de forma contínua com base em testes, análise de falhas e mudanças no design ou substituição de componentes. Vários testes podem ser realizados durante esse processo de desenvolvimento — quando as exigências competitivas comprimem o cronograma de desenvolvimento, métodos de teste acelerado são comumente incluídos. No HALT, a confiabilidade melhora como resultado de um processo iterativo de teste-correção-teste, conhecido na literatura como crescimento da confiabilidade. Praticantes há muito tempo desejam um modelo para traduzir os dados limitados produzidos durante o HALT em uma estimativa útil do crescimento da confiabilidade de um produto (COLLINS et al., 2013).

De acordo com Cooper (2017), dois obstáculos comuns para o sucesso do HALT são a falta de compreensão da necessidade de submeter o produto a níveis de estresse muito além das especificações e a ausência de análise de falhas e determinação da causa raiz. Quando os níveis de estresse são restritos para evitar falhas ou quando não há uma análise adequada dos modos de falha, o HALT perde sua eficácia na melhoria da confiabilidade do produto, tornando-se apenas um teste de caracterização.

HALT não é a única ferramenta de engenharia de confiabilidade e não deve substituir outros métodos poderosos; em vez disso, deve complementá-los. A engenharia de confiabilidade geralmente se divide em análises de engenharia (como análise de redução de tensão, análise térmica, análise de elementos finitos) e análises de falhas (como *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) e *Fault Tree Analysis* (FTA)). No entanto, ao realizar o HALT, a equipe de design observa os modos de falha reais, ao invés de apenas antecipá-los. Dessa forma, o FMEA de design é uma excelente ferramenta para planejar a execução do HALT, pois os modos de falha identificados no HALT frequentemente correspondem aos identificados no FMEA, especialmente aqueles com alta probabilidade de ocorrência (BARNARD, 2012).

Silverman (1998) conduziu um estudo com 47 produtos de 33 empresas representando 19 setores da indústria. Os resultados de todos os produtos testados foram combinados e resumidos para preservar a confidencialidade dos clientes. Em média, um teste HALT foi concluído em 4 dias, com a maioria dos clientes completando o teste em uma única visita e corrigindo os problemas posteriormente. Alguns, no entanto, optaram por dividir o HALT em várias visitas, verificando as ações corretivas antes de aplicá-las nas versões de produção. A distribuição de falhas por tipo de estresse seguiu a ordem dos testes: estresse térmico a frio, estresse térmico a quente, transições rápidas de temperatura, estresse vibracional e ambiente combinado. Ao analisar os dados é notável que, ao realizar o ambiente combinado, 20% das falhas adicionais foram detectadas, o que demonstra a importância de não pular essa etapa.

Figura 9 - Divisão entre falhas por tipo de estresse



Fonte: Cooper, (2017) Adaptado.

HALT é geralmente considerado um método qualitativo, mas há alegações de que ele pode fornecer resultados quantitativos. Embora os testes possam fornecer dados binários (funciona ou não sob condições específicas), o pequeno número de testes e as mudanças nas condições de teste e no design do produto dificultam a análise estatística tradicional. No entanto, testes altamente acelerados em projetos ou materiais específicos podem fornecer uma classificação dos designs. O objetivo ideal seria obter uma previsão quantitativa da vida útil

de sistemas ou componentes, como uma função de distribuição ou taxa de falhas (COLLINS et al., 2024).

No desenvolvimento de produtos para a indústria de linha branca, a confiabilidade dos componentes é um fator determinante para a qualidade e longevidade dos produtos finais. A metodologia Highly Accelerated Life Test (HALT) é amplamente utilizada para avaliar a durabilidade dos componentes e identificar possíveis falhas em condições extremas de operação. Neste estudo de caso, foi utilizada uma aplicação real dentro de uma empresa de linha branca que a título de simplicidade e confidencialidade denominei por W, que busca validar um novo fornecedor, empresa R, para o componente A, que atualmente é fornecido exclusivamente pela empresa Z.

O componente A trata-se de um suporte metálico para a resistência que promove o aquecimento da água em produtos específicos de lavanderia que apresentam a funcionalidade de água quente. Portanto, é um componente essencial para o bom desempenho da troca de calor entre a resistência e a água. Durante um ciclo de funcionamento, este componente sofre principalmente estresses por variações de temperatura, devido ao contato com a resistência, que, com o passar do tempo, aquece sua superfície, e com a água fria que entra no compartimento. Além disso, o componente A também entra em contato com substâncias químicas, como o alvejante, que possui propriedades corrosivas.

A decisão de testar um novo fornecedor baseia-se em fatores como otimização de custos, redução da dependência de um único fornecedor e possibilidade de melhoria na qualidade e no desempenho do componente. No entanto, antes de integrar o novo fornecimento à linha de produção, é essencial garantir que o componente A da empresa R atenda aos mesmos padrões de confiabilidade e durabilidade já estabelecidos com o fornecedor atual.

Durante o experimento, foram utilizados produtos funcionais, e uma programação de lavagem específica foi estabelecida para avaliar a fadiga no pior caso de funcionamento. Entre cada ciclo de funcionamento do produto, foi adicionada uma quantidade de alvejante duas vezes maior que a recomendada, com o objetivo de aumentar o fator de estresse do

componente A. Além disso, a função de água quente foi utilizada em todos os ciclos, técnicos estavam atentos para identificar possíveis falhas e a cada 10 ciclos a operação do produto foi interrompida para realização de uma análise qualitativa através da imagem.

O foco do experimento foi identificar possíveis falhas no componente A por meio da aplicação de um alto nível de estresse, gerando um fator que, quando contabilizado, determina o número mínimo de ciclos de funcionamento necessários para ser equivalente ao período de vida útil mínimo exigido para o componente, conforme o uso do consumidor. Portanto, após o cálculo desse número mínimo de ciclos, espera-se que os produtos com os componentes A do fornecedor R não apresentem falhas durante esse período. Após a execução do teste, verificou-se que todas as amostras não apresentaram falhas relacionadas à perda de funcionalidade, alteração dimensional, quebras ou trincas, ou seja, foram aprovadas.

O teste foi limitado ao atingimento do número mínimo de ciclos calculado, sendo interrompido em seguida, pois se tratava de um teste qualitativo para aprovação, e não um teste comparativo. Além disso, a continuidade do teste resultaria no uso excessivo de recursos. Por fim, mesmo com a aprovação das amostras do componente A fornecidas pelo fornecedor R neste experimento utilizando o método HALT, a aprovação técnica final pode exigir outros testes, conforme a análise do FMEA, bem como a elaboração e aprovação de uma documentação em um fórum técnico, a fim de demonstrar a viabilidade do projeto, seja para troca de fornecedor ou para mudança na porcentagem de fornecimento entre as empresas.

5. CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia HALT (Highly Accelerated Life Testing) na indústria de linha branca se mostra essencial para garantir a confiabilidade dos produtos desde as fases iniciais do desenvolvimento. Em um setor caracterizado por tecnologias maduras e pouca inovação disruptiva, a metodologia HALT permite a identificação precoce de vulnerabilidades, acelerando o ciclo de testes e possibilitando a introdução de produtos mais robustos no mercado antes dos concorrentes. A crescente exigência por qualidade e eficiência energética reforça a importância da adoção de testes acelerados, consolidando a HALT como uma ferramenta estratégica no desenvolvimento de componentes e produtos que atendam aos padrões de confiabilidade esperados pelos consumidores e fabricantes.

Com base nos dados obtidos, a empresa W pôde determinar se os componentes A fornecidos pela empresa R são resistentes o suficiente para suportar o tempo de vida dos produtos. No entanto, apenas com esse experimento não é possível validar se o componente fornecido por eles atende a todos os requisitos mapeados no FMEA, outros testes podem ser necessários. Além da viabilidade técnica, a aprovação final também precisa levar em consideração fatores como: estratégia para o gerenciamento de fornecedores para o componente, possíveis flutuações nos valores de cada empresa, cláusulas estabelecidas em cada contrato e o relacionamento com cada fornecedor. Fatores esses que estão fora dos limites de escopo deste trabalho.

Vale ressaltar que a aplicação promovida neste estudo de caso é apenas uma das possibilidades e a metodologia HALT tem uma grande capacidade de auxiliar na tomada de decisão durante o processo de desenvolvimento de produto como foi observado na revisão bibliográfica deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Panorama econômico e desempenho setorial 2024**, 2024. Disponível em: <https://www.abinee.org.br/arquivos/decon/panorama/2024/>. Acesso em 27 jan. 2025.

BARNARD, A. **Ten things you should know about HALT & HASS**. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*, Reno, USA, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6175457>. Acesso em: 27 ago. 2024.

BARNETT, B. D.; CLARK, K. B. Problem solving in product development: a model for the advanced materials industries. **International Journal of Technology Management**, v. 15, n. 8, p. 805-820, 1998. Disponível em: https://eurekamag.com/research/016/753/016753745.php?srltid=AfmBOoo4ErbMvkEEVxWC-t_7L728E6tbsVWFHL6hZFIQR6xUp9stfVE-. Acesso em: 27 ago. 2024.

BARNI, E. M; SILVA, D. Planejamento E Controle De Produção E Vendas No Ramo De Eletrodomésticos. **International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM)**, Volume 3, Issue 9 Sep 2021, pp: 1317-1322. Disponível em: https://ijaem.net/issue_dcp/Planejamento%20E%20Controle%20De%20Producao%20E%20Vendas%20No%20Ramo%20De%20Eletrodomesticos.pdf. Acesso em: 27 jan. 2025

BORGHI, R. A. Z., The Brazilian productive structure and policy responses in the face of the international economic crisis: An assessment based on input-output analysis. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0954349X17302369#sec0030> Acesso em: 27 jan. 2025

CADAMURO, A. **A indústria de linha branca no Brasil - Diagnóstico e Propostas dos Metalúrgicos**, 2012. Confederação Nacional dos Metalúrgicos da CUT- CNM/CUT e Federação dos Sindicatos Metalúrgicos da CUT/SP - FEM-CUT/SP. Disponível em: <https://silo.tips/download/a-industria-da-linha-branca-no-brasil-propostas-dos-metalurgicos>. Acesso em: 19 ago. 2024.

CALIFE, N. F. S. **Estratégia de produção e gestão de suprimentos: estudo de casos no setor de linha branca**. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3589/2214.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2024.

CHRUSCIEL, M. R. **Improving product reliability through HALT & HASS testing of electronics and PCB's**. In IPC APEX EXPO Conference Proceedings, volume 1, pages 402–418, 2013. Disponível em:

https://www.ipc.org/system/files/technical_resource/E2%26S08_01.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.

COLLINS, D. H. et al. Accelerated test methods for reliability prediction. **Journal of Quality Technology**, v. 45, n. 3, p. 244-259, 2013. Disponível em:

https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00224065.2013.11917936?casa_token=sIIsisZ4pJ0AAAAA:84d2YlJ69ulGexE2dTsqkaHmohnTjYu7t-hK7d6LfCZwm1dl15nc_NUdZqx8vwutHp2bRrLopgc0Vg. Acesso em: 27 ago. 2024.

COOPER, J. Introduction to Halt - Making Your Product Robust, From the Proceedings of the SMTA Pan Pacific Microelectronics Symposium 2017, 2017. Disponível em:

https://www.minooscollection.com/images/papers/SMTA-PanPac2017_Intro-to-HALT.pdf
Acesso em: 27 jan. 2025

COSTA, M. A. **Análises das práticas da gestão do processo de desenvolvimento de produtos em empresas de revestimento cerâmico de Santa Gertrudes – Estado de São Paulo**. 2009. 202 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/3642?show=full>. Acesso em: 27 ago. 2024.

CUNHA, A. M. **As novas cores da linha branca: os efeitos da desnacionalização da indústria brasileira de eletrodomésticos nos anos 90**. 2003. Tese (Doutorado em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, UNICAMP, Campinas, 2003. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/294695>. Acesso em: 19 ago. 2024.

CUSTOM MARKET INSIGHTS. **Global Household Appliances Market 2025–2034**, 2023. Disponível em:

<https://www.custommarketinsights.com/report/household-appliances-market/#>. Acesso em: 27 jan. 2025.

DODSON, B.; NOLAN, D. **Reliability Engineering Handbook**. Marcel Dekker Inc., New York, New York / Quality Publishing, Tucson, Arizona, 1999, 639p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=ONjL1iRrZYAC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 27 ao. 2024.

DOS SANTOS, G. T. **Modelo de confiabilidade associando dados de garantia e pós-garantia a três comportamentos de falhas**. 2008. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em

Engenharia de Produção, Porto Alegre, 2008. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/15293>. Acesso em: 27 ago. 2024.

FERNANDES, C. G.; **Metodologia para Melhorar a Confiabilidade de Subsistemas Através de Análise de Falhas e Testes Acelerados**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Produção, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25044/000747933.pdf;jsessionid=A22317F16E32F8D01FD07D89693E6714?sequence=1>. Acesso em: 27 ago. 2024.

FILIPPINI, R.; SALMASO, L.; TESSAROLO, P. Product Development Time Performance: Investigating the Effect of Interactions between Drivers. **Journal of Product Innovation Management**, v. 21, n. 3, p.199-214, 2004. Disponível em:
https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.0737-6782.2004.00070.x?casa_token=sE1PNOgA5QMAAAAA:~AQ-8m5YIbNxcH8ocqZtwDJhfMFLwk1ps8yfPwk9sXgv1WMLFh1UIKFjCAbBPQrApS2KNHosx0-sBQTfZ. Acesso em: 27 ago. 2024.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Elsevier, Rio de Janeiro, 2009.

FREELS, J. K.; PIGNATIELLO, J. J.; WARR, R. L.; HILL, R. R. Bridging the gap between quantitative and qualitative accelerated life tests. **Quality and Reliability Engineering International**, 2015. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qre.1636>. Acesso em: 27 ago. 2024.

GITAHY, L. M. C.; DA LUZ, N. S. (2008). Transformações na indústria de linha branca: impactos sobre o emprego. **Revista Tecnologia e Sociedade**, 2008. Disponível em:
<https://revistas.utfpr.edu.br/rts/article/view/2525>. Acesso em: 19 ago. 2024.

INVERNIZZI, N. **Novos rumos do trabalho**: mudanças nas formas de controle e qualificação da força de trabalho brasileira. Tese (Doutorado em Política Científica e Tecnológica), Instituto de Geociências, UNICAMP, Campinas, 2000. Disponível em:
<https://revistas.ufpr.br/educar/article/view/2197/1849>. Acesso em: 19 ago. 2024.

JAYATILLEKA, S.; OKOGBAA, O. G. **Accelerated life testing for speedier product development**: problems and strategies. Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2006. IEEE, 2006. p. 318-324. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/224644134_Accelerated_life_testing_for_speedier_product_development_Problems_and_strategies. Acesso em: 19 ago. 2024.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**, v.1. DEStech publications, 2002.

Disponível em:

https://books.google.com.br/books?id=IV6_GCFVWIIQC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 27 ago. 2024.

LIM, J. S.; SHARKEY, T. W.; HEINRICHS, J. H. New product development practices and export involvement: an initial inquiry. **International Journal of Innovation Management**, v. 7, n. 4, p.475-499, 2003. Disponível em:

https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/S136391960300088X?srsltid=AfmBOooa-ODEphoEi0c1r5_hbLOhVb7gWaNf0xNIFsvrwiR10YqxmaXJ. Acesso em 27 ago. 2024.

MACHADO, M.C.; TOLEDO, N.N. **Gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos:**

Uma abordagem baseada na criação de valor. São Paulo: Atlas, 2008. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/315679676_Gestao_do_Processo_de_Developvimento_de_Produtos_uma_abordagem_baseada_na_criacao_de_valor. Acesso em: 27 ago. 2024.

MADU, C. N. Reliability and quality interface. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v.16, n. 7, p. 691-698,1999. Disponível em:

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02656719910286198/full/html>. Acesso em: 27 ago. 2024.

MATUSITA, Ana Paula. **Mudança estrutural no setor de linha branca nos anos 90:**

características e condicionantes. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências,

UNICAMP, Campinas, 1997. Disponível em:

https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UNICAMP-30_92c633bd23d795452f2271952cd789b7. Acesso em: 19 ago. 2024.

MCLEAN, H. W. **HALT, HASS, and HASA Explained: Accelerated Reliability Techniques**. 1st ed. Milwaukee: American Society for Quality Press, 2009. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=gpHtEAAAQBAJ&lpg=PP1&hl=pt-BR&pg=PR4#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 19 ago. 2024.

MEEKER, W. Q.; ESCOBAR, L. A. Review of Accelerated Test Models. **Statistical Science**, v. 21. n. 4, p.553-577, 2006. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/1758658_A_Review_of_Accelerated_Test_Models. Acesso em: 27 ago. 2024.

MURTHY D.N.P; Djamaludin I., New Product Warranty: A literature review. **International Journal of Production Economics**, 2002. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527302001536>. Acesso em: 27 ago. 2024.

- O'CONNOR; Patrick D. T.; **Practical Reliability Engineering**, 3ed. – John Wiley & Sons Ltd. 1995. Disponível em:
https://qpr.buaa.edu.cn/_local/0/84/8F/A2BDB6F3FA40379E02A57D9F3DE_D2D40D98_482391.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.
- GRAY, K. A.; PASCHKEWITZ, J. J. Next Generation HALT and HASS: Robust Design of Electronics and Systems. **John Wiley & Sons**, Chichester, UK, 2016. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/308995397_Next_Generation_HALT_and_HASS_Robust_Design_of_Electronics_and_Systems. Acesso em: 27 ago. 2024.
- PASOLINI, M.; TOMASI, G.; VIDOR, G. Implementação de cálculo de confiabilidade para determinação da garantia de um novo produto. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, [S. l.], v. 14, n. 1, p. 156, 2019. DOI: 10.15675/gepros.v14i1.2087. Disponível em:
<https://revista.feb.unesp.br/gepros/article/view/2087>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- PIMENTA, L. C. N. **APQP: Caracterização da aplicação da metodologia de gestão de desenvolvimento de produtos em fornecedores dos setores de linha branca e automotivo**. 2009. 190 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em:
<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3602/2549.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- PIZZOLATO, M.; CATEN, C. S. T.; FOGLIATTO, F. S. Definição do prazo de garantia de um produto otimizado experimentalmente. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 2, p.239-253, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/XtpcmBwNNtK6PsJr8Swf8gn/?lang=pt>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- PRASAD, B. **Concurrent engineering fundamentals: integrated product and process organization**. New Jersey: Prentice Hall International Series, v.1, 1996. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/264457718_Concurrent_Engineering_Fundamentals_Vol_I_Integrated_Product_and_Process_Organization. Acesso em: 27 ago. 2024.
- ROTTA, I.S. **Mini-Fábrica: Uma nova proposta de arranjo produtivo e organizacional híbrido em uma empresa do setor eletroeletrônico**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004. Disponível em:
<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3419/TeseISR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 ago. 2024.
- ROZENFELD, H. et al. **Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo**. São Paulo, SP: Saraiva, 2006. Acesso em: 19 ago. 2024.

SALGADO, E. G.; SALOMON, V. A. P.; MELLO, C. H. P.; FASS, F. D. M.; XAVIER, A. F. Modelos de referência para desenvolvimento de produtos: classificação, análise e sugestões para pesquisas futuras. **Revista Produção Online**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 886–911, 2010. DOI: 10.14488/1676-1901.v10i4.520. Disponível em:

<https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/520>. Acesso em: 19 ago. 2024.

SALGADO, M. F. P. **Aplicação de técnicas de otimização à Engenharia de Confiabilidade**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8CDG4N>. Acesso em: 27 ago. 2024.

SASKIA M. de T.; PETER C. S.; BROMBACHE A. C. R. Reliability tests to control design quality: a case study. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 15 n. 6, p. 599-618, 1998. Disponível em:

<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02656719810226528/full/html>. Acesso em: 27 ago. 2024.

STATISTA, **Household Appliances - Brazil**, 2025, Disponível em:

<https://www.statista.com/outlook/cmo/household-appliances/brazil>

MORDOR INTELLIGENCE, **Brazil Household Appliances Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2025 - 2030)**, 2024. Disponível em:

<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/brazil-home-appliances-market>. Acesso em: 27 jan. 2025.

M. SILVERMAN. **Summary of HALT and HASS Results at an Accelerated Reliability Test Center**. Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1998.

Disponível em:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Summary-of-HALT-and-HASS-results-at-an-accelerated-Silverman/4a0c7403b36b5588cbdf5a223d9a61340ceec91e>. Acesso em: 27 ago. 2024.

TAIICHI, O. **Toyota production system: beyond large-scale production**. Portland:

Productivity pres, 1988. Disponível em:

<http://dspace.vnbrims.org:13000/jspui/bitstream/123456789/4694/1/Toyota%20Production%20System%20Beyond%20Large-Scale%20Production.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2024.

VOLLERT, J. R. **Confiabilidade e falhas de campo: um estudo de caso para melhoria da confiabilidade de um produto e do reparo, através de um procedimento sistemático de coleta de dados**. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/76954>. Acesso em: 27 ago. 2024.

WOMACK, J. P. et al. , **A Máquina que mudou o mundo**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Campus. 1992. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?isd=PILHfE1qx90C&lpg=PP1&hl=pt-BR&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 19 ago. 2024.

YADAV; O. P.; SINGH N.; GOEL P. S. Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. **Reliability Engineering and System Safety**, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832005001924>. Acesso em: 27 ago. 2024.

YANG, G.; ZAGHATI, Z. **Accelerated life tests at higher usage rates: a case study**. Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2006. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1677393?casa_token=JhNDWWxmQI8AAAAA:FyjnqBApoM_c0V8M0flQ6MTQgIt2lHqd0xE_kYPB1n-IObwB9M1COkvoPHk4EOuxxc7bs9wUiDs. Acesso em: 27 ago. 2024.