

## Proposta de uma Plataforma para Teste em Tempo Real de Sistemas de Internet Tátil

Pedro V. A. Alves\* Marcelo A. C. Fernandes\*\*

\* *Laboratório de Aprendizagem de Máquina e Instrumentação Inteligente, nPITI/IMD, UFRN, Natal, RN, Brasil (e-mail: pedro.andrade046@gmail.com).*

\*\* *Departamento de Engenharia de Computação e Automação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil (e-mail: mfernandes@dca.ufrn.br)*

---

**Abstract:** This work aimed to develop a test platform, in real-time, for tactile internet applications. The platform is formed by a master device called here master device (MD), a channel, and a slave device called here slave device (SD). MD is a tactile glove based on vibratory feedback, responsible for making interaction with virtual or remote objects possible. A software platform models the communication channel and SD in the Matlab-Simulink environment. The channel simulates a low latency connection, and the SD is characterized by a Phantom Omni-type robotic manipulator, which is simulated through the Matlab-Simulink environment. Tactile sensations of coarse roughness, fine roughness, smoothness, dripping, and smoothness were developed and modeled. The platform presented very satisfactory results in which it can be used to simulate various scenarios, algorithms, and devices associated with the tactile internet.

**Resumo:** Esse trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma plataforma de teste, em tempo real, para aplicações em internet tátil. A plataforma é formada por um dispositivo mestre chamado aqui de *master device* (MD), um canal e um dispositivo escravo chamado aqui de *slave device* (SD). O MD é uma luva tátil baseada em *feedback* vibratório, responsável por tornar possível a interação com objetos virtuais ou remotos. Já o canal de comunicação e o SD são modelados por uma plataforma de software no ambiente Matlab-Simulink. O canal simula uma conexão de baixa latência e o SD é caracterizado por um manipulador robótico do tipo Phantom Omni no qual é simulado através do ambiente Matlab-Simulink. Foram desenvolvidas e modeladas sensações táteis de rugosidade grossa, rugosidade fina, lisura, gotejamento e suavidade. A plataforma apresentou resultados bastante satisfatórios no qual poderá ser utilizada para simular vários cenários, algoritmos e dispositivos associados a internet tátil.

*Keywords:* Tactile internet, Real time, Tactile glove, Manipulator

*Palavras-chaves:* Internet tátil, Tempo real, Luva tátil, Manipulador

---

### 1. INTRODUÇÃO

Segundo Aijaz et al. (2016), Meryem et al. (2016), Fettweis (2014) e Dohler and Fettweis (2015), sistemas baseados em internet tátil são tecnologias emergentes. Sendo eles divididos em três elementos: dispositivo mestre, rede e dispositivo escravo, de acordo com Aijaz (2016); Junior et al. (2019, 2020). Os modos de operação podem variar, principalmente, entre teleoperação e *machine to machine* (M2M), respectivamente: mestre humano, escravo robô e mestre robô, escravo robô conforme definido em Aijaz (2016), Junior et al. (2020) e Junior et al. (2020). A rede fornece infraestrutura para transmissão de sensações táteis entre os dispositivos (mestre e escravo). A comunicação do mestre para o escravo é nomeada como direta, e são enviados dados de posição. Informações trocadas do escravo para o mestre se configura como comunicação de *feedback*, e é responsável pela transmissão de dados táteis, segundo apresentado em Aijaz et al. (2016), Meryem

et al. (2016), Junior et al. (2019), Fettweis (2014) e Junior et al. (2020). A latência na troca de informações entre os elementos do sistema tátil precisa ficar entre 1 e 10 ms normalmente e 100 ms em alguns casos, sendo esse um critério fundamental presente em (Li et al., 2018), (Nasrallah et al., 2018), (Junior et al., 2019) e (Junior et al., 2020).

Desta forma, este artigo tem como meta apresentar o desenvolvimento de uma plataforma de teste, em tempo real, para internet tátil. Os três principais elementos dela são: MD, canal e SD. O MD, neste projeto, é uma luva tátil, tecnologia vestível que funciona como interface tátil baseada em *feedback* vibratório, gerado por micromotores, responsável por tornar possível a interação com objetos virtuais ou remotos. A inserção do estímulo tátil proposto por essa plataforma, unida com a resposta visual, é capaz de tornar a experiência, de interação, mais realista. O tato além de ser um canal sensorial, aumenta a sensibilidade dos outros canais, segundo (Spence, 2003). O canal de

comunicação entre o MD e o SD é uma conexão de baixa latência. O SD da plataforma descrita é um manipulador robótico do tipo Phantom Omni presente no ambiente Matlab-Simulink através do *robotics* toolbox Junior et al. (2019) e Junior et al. (2020). O toque do manipulador robótico em posições pré-definidas de um plano, representa contato com objetos de diferentes texturas, dessa maneira, são geradas as sensações táteis correspondentes no MD.

Em D'Abbraccio et al. (2019a) é apresentada uma plataforma de simulação voltada para apalpação médica, em tempo real, com retorno de tato. O dispositivo mestre se configura como uma luva capaz de receber o retorno tátil na ponta do dedo indicador através de um atuador piezoelétrico. O elemento responsável por entrar em contato com os pacientes e enviar informações de possíveis nódulos é um manipulador robótico do tipo Phantom, que funciona como dispositivo escravo. A plataforma tátil proposta neste trabalho se diferencia da plataforma para apalpação médica, citada, pelo tipo de *feedback* utilizado. Em Oteafy and Hassanein (2018), são introduzidas técnicas de IA (inteligência artificial), como previsão, para compensar o atraso no controle de dispositivos táteis e melhorar a percepção das operações em tempo real, tornando mais natural o retorno tátil.

De forma similar a proposta apresentada neste trabalho, os artigos Lin et al. (2018), Lobo and Trindade (2013), Arjun et al. (2018) e Weber et al. (2016) capturam os movimentos da junta através de um sensor inercial chamado de IMU. A utilização desse componente ajuda na escalabilidade pelo baixo custo, ou seja, é possível aumentar o número de juntas monitoradas sem encarecer muito o projeto. Em Yang and Choi (2018) é apresentado uma forma mais complexa de mensurar movimentação, sendo ela a utilização de câmera. Em D'Abbraccio et al. (2019b) dispositivos *Leap Motion* são usados para detectar rotações no punho e cotovelo.

Segundo Muramatsu et al. (2013), uma sensação tátil é gerada, após o toque em uma determinada superfície, com base em: sentido visual, sonoro, tátil, memória e palavras. Neste estudo as sensações táteis foram desenvolvidas baseadas em estímulos vibratórios usando sinais PWM e alterando os seguintes parâmetros: ciclo de trabalho, tempo de pulso alto, frequência e período. Estes estímulos foram gerados com base na tensão usada em micromotores de vibração. As sensações táteis deste trabalho foram desenvolvidas e são utilizadas de forma semelhante ao artigo citado.

## 2. ARQUITETURA PROPOSTA

### 2.1 Arquitetura geral

A arquitetura geral da plataforma tátil proposta, ilustrada na Figura 1, possui como entidades fundamentais: operador, MD, hardware do *master device* (HMD), canal, ambiente de simulação, hardware do *slave device* (HSD), SD e ambiente. O MD é controlado por um operador e se configura como uma luva tátil, baseada em *feedback* de vibração, que se comunica com um HMD formado por uma circuito eletrônico responsável pelo envio e recebimento de dados oriundos dos demais elementos da arquitetura. O canal tem a função de introduzir atraso na comunicação,

bidirecional, entre o HMD e o ambiente de simulação. O HSD e o manipulador robótico do tipo Phantom Omni são elementos pertencentes a entidade ambiente de simulação e, ambos, funcionam como ferramentas necessárias para replicar os movimentos, do MD, realizados pelo operador em um ambiente que pode ser virtual ou remoto.

### 2.2 HMD e MD

O operador da plataforma tátil, descrita neste trabalho, envia dados de rotação para o MD por meio dos movimentação da mão com a luva tátil. Este procedimento indica o início do processo de exploração tátil do ambiente no qual o SD está inserido. Ao fim de um ciclo de operação da plataforma, a luva tátil, aciona o *feedback* vibratório com objetivo de simular, na mão do operador, a sensação tátil ( $s$ ) relativa a textura tocada pelo Phantom Omni.

O HMD, entidade responsável pelo funcionamento do MD, é composto por um conjunto de 6 micromotores ( $M_1, M_2, \dots, M_6$ ), 2 optoacopladores ( $Op_1, Op_2$ ), um IMU, uma bateria e um microcontrolador. A chegada de *feedback* vibratório no MD ocorre por meio de sinais PWM expressos como ( $P_1(t), P_2(t), \dots, P_6(t)$ ) gerados pelo microcontrolador, que chegam nos micromotores ( $M_1, M_2, \dots, M_6$ ) após o isolamento gerado pelos optoacopladores ( $Op_1, Op_2$ ) ao circuito de controle (microcontrolador) e potência (micromotores). O IMU, utilizado, unido ao microcontrolador, tem como função capturar a rotação realizada pelo MD em forma de ângulos de Euler e com isto possibilita o envio desses dados, através de uma porta serial, para entidades externas ao HMD.

O MD da plataforma proposta, como mostrado de forma frontal e traseira, respectivamente, nas Figura 2(b) e 2(c), consiste em uma luva tátil que possui quatro segmentos fundamentais, sendo eles: luva, IMU, microcontrolador e micromotores de vibração. A base do HMD é a luva presente na Figura 2(a), onde os componentes são montados. O IMU é responsável por permitir teleoperação através da replicação dos movimentos da luva tátil no manipulador robótico. O resultado da movimentação do Phantom Omni ativa os micromotores na vibração referente a sensação tátil da posição que indica a textura do objeto, virtualmente, tocado. O controle do sistema é feito por meio do microcontrolador de uma placa Arduino Mega 2560.

Na Figura 3 é possível identificar o circuito eletrônico (HMD), responsável por reunir os elementos capazes de permitir a execução das diferentes funcionalidades do MD. Sendo eles: micromotores de vibração (ROB-08449), optoacopladores (TLP627-4), placa Arduino Mega 2560, MPU6050 e bateria. Este circuito tem como componente principal o microcontrolador ATmega2560, uma vez que ele é utilizado na finalidade de controlar e processar os dados de entrada e saída da luva tátil, tanto no recebimento de sinalizações para gerar sensações táteis quanto no envio de dados de orientação para posterior controle do SD.

O MD unido a sua unidade de processamento (ATmega2560), habilita o correto comportamento de toda a plataforma, ou seja, o fluxo de dados através dela atinge a finalidade de realizar manipulação remota. O microcontrolador presente no HMD permite ao Phantom Omni

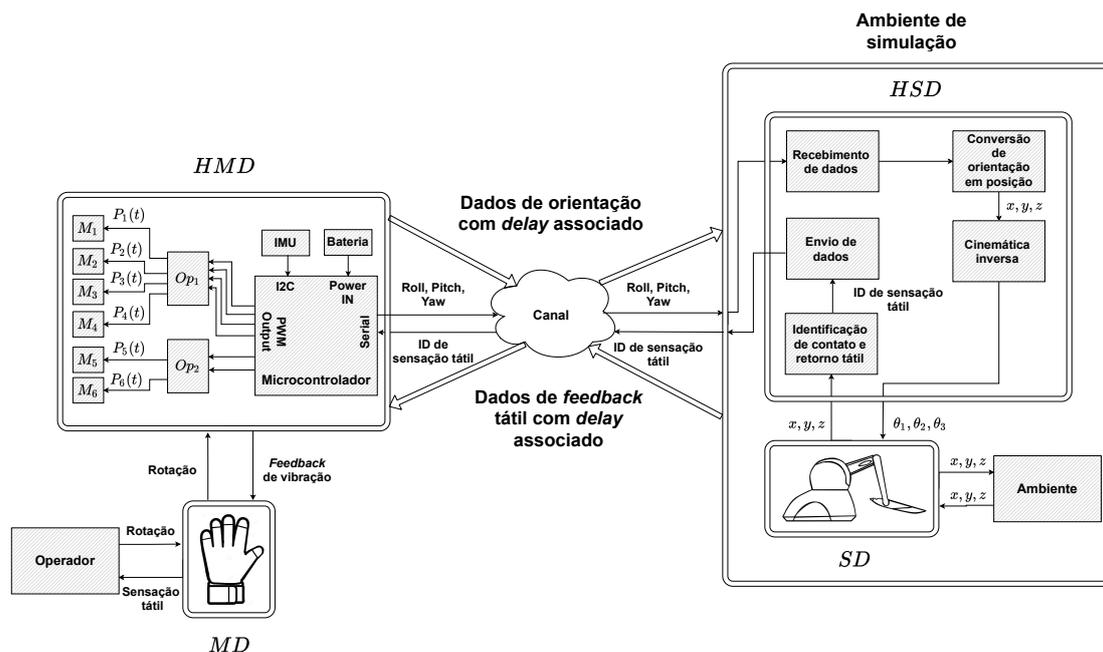


Figura 1. Arquitetura da plataforma tátil proposta.

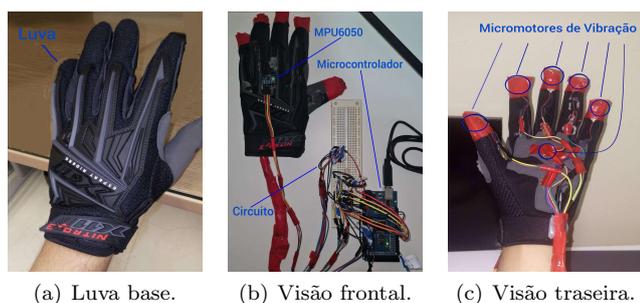


Figura 2. Luva tátil (*master device*).

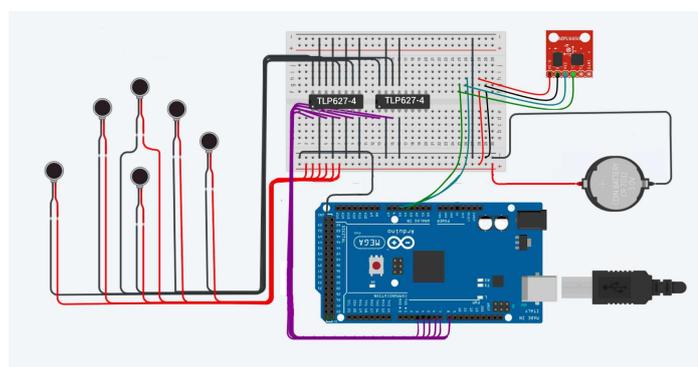


Figura 3. Circuito proposto do HMD.

se deslocar replicando os movimentos da luva tátil, e os objetos tocados por ele são sentidos pelo operador, por meio da atuação dos micromotores, que são ativados pelos sinais PWM gerados por esta unidade de processamento.

Conforme apresentado na Figura 3 a placa Arduino Mega 2560 possui, conectada a ela, dois núcleos de componentes com propósitos diferentes, sendo eles a geração de sensações táteis por meio dos micromotores de vibração ROB-08449 (a esquerda) e a leitura da orientação da luva tátil através do IMU (*inertial measurement unit*) do tipo MPU6050 (a direita).

### 2.3 Canal de comunicação

O canal é uma entidade de software cuja finalidade é simular uma conexão de baixa latência introduzindo atraso ao envio de dados relativos aos ângulos de Euler (*roll, pitch, yaw*), com origem no HMD e destino ao ambiente de simulação. O identificador de sensação tátil também passa pelo atraso atribuído pelo canal e é enviado do ambiente de simulação em direção ao HMD. A troca de dados, bidirecional, entre as entidades HMD e ambiente simulação possui o canal como elemento de ligação entre os dois núcleos distintos da plataforma, sendo um deles referente ao MD e o outro ao SD. A entidade canal, desenvolvida, atribui a troca de dados uma latência fixa de 10 ms, sendo esse valor escolhido com base em (Li et al., 2018), (Nasrallah et al., 2018), (Junior et al., 2019) e (Junior et al., 2020).

### 2.4 Ambiente de simulação

O ambiente de simulação contém a entidade HSD como elemento de preparação dos dados oriundos do HMD a serem enviados para o SD, no formato de ângulos de junta ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ), e também tem a finalidade de encaminhar o identificador do retorno tátil, ou até mesmo a ausência dele, para o HMD após verificar a posição do SD. Os dados de saída do HSD, na direção do SD, buscam movimentar o Phantom Omni explorando as informações táteis do ambiente em análise. A entrada de dados do HSD,

oriundas do SD, recebe informações de posição cartesiana do manipulador robótico.

Após o atraso inserido pela entidade canal, os dados de orientação (*roll*, *pitch*, *yaw*) são recebidos pelo HSD através de um elemento dedicado ao recebimento e tratamento, inicial, das informações a serem usadas, posteriormente, pelo bloco de controle do SD, o HSD. Os ângulos de Euler são convertidos por um componente que retorna posição cartesiana ( $x, y, z$ ) para ser transformada em ângulos de junta ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ) pelo bloco de cinemática inversa. O HSD tem entradas e saídas em direção ao HMD, passando pelo canal, e na direção do SD. Sendo os dados trocados, respectivamente, ângulos de Euler, identificador de sensação tátil, posição cartesiana, ângulos de junta.

O HSD, deste trabalho, se configura como um modelo desenvolvido na plataforma Matlab-Simulink com os componentes conectados conforme pode ser observado na Figura 1. Os blocos responsáveis pela chegada de dados no SD, são: recebimento de dados, conversão de orientação em posição e cinemática inversa. Simultaneamente a movimentação do SD no ambiente, dados são enviados ao HMD para posterior simulação das sensações táteis no MD através dos elementos: identificação de retorno tátil e envio de dados.

O SD da plataforma tátil proposta, neste projeto, se configura como um manipulador robótico do tipo Phantom Omni presente na plataforma Matlab-Simulink através do Peter Corke *robotics* toolbox. Nas Figuras 4(a) e 4(b) é possível identificar, respectivamente, o modelo no Simulink e real do elemento controlado pela luva tátil da plataforma proposta. O robô Phantom Omni utilizado possui como principais características ter três graus de liberdade, 3-DoF, distribuídos em três juntas, rotacionais, responsáveis por interligar os elos dele.

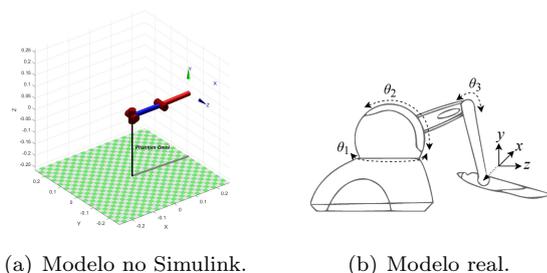


Figura 4. *Slave device* da plataforma tátil.

### 2.5 Sensações táteis

O *feedback* vibratório, produzido pelos micromotores de vibração do tipo ROB-08449 da plataforma, é responsável por gerar as sensações táteis, e o PWM realiza alterações na vibração possibilitando impor particularidades referentes a diferentes texturas. Uma sensação tátil ( $s$ ), pode ser expressa como uma função,  $g(\cdot)$ , das variáveis: ciclo de trabalho ( $d$ ) e frequência ( $f$ ), ou seja,

$$s = g(f, d). \quad (1)$$

A frequência do sinal PWM é responsável por alterar o tipo de vibração entre duas possibilidades: constante ou com chaveamento perceptível, modo em que é possível perceber

a mudança entre os estados ligado e desligado dos atuadores. As vibrações constantes são referentes as frequências altas e neste caso o micromotor vibra na intensidade imposta pela tensão aparente ( $v_{apar}$ ) que é constante. O aumento na intensidade da vibração constante é atrelada ao aumento do  $d$  e conseqüentemente da  $v_{apar}$ .

A  $v_{apar}$  se configura como um valor de voltagem percebido pelos componentes eletrônicos, que não é necessariamente igual a tensão de referência ( $v_{ref}$ ), como efeito da aplicação de sinais PWM. Quando a frequência do sinal é elevada o suficiente, a tensão no terminal dos micromotores de vibração se torna um valor entre 0v e  $v_{ref}$ , ou seja, é uma  $v_{apar}$ . O  $d$  é responsável por controlar se os componentes irão receber a influência de mais ou menos tensão dentro da faixa de amplitude para  $v_{apar}$ . O cálculo da  $v_{apar}$  pode ser expresso como

$$v_{apar} = v_{ref} \times d. \quad (2)$$

Frequências baixas geram vibrações com chaveamento perceptível. Este modo de operação possui como resultado vibrações similares a batidas alternadas. A constância do chaveamento pode ser alterada com uma diminuição fina da frequência. Neste caso o micromotor vibra na intensidade imposta pela  $v_{ref}$  em um momento e depois no zero volts, ou seja, a alternância entre os estados ligado e desligado se torna perceptível.

A primeira escolha para formar o par de variáveis referente a função  $g(\cdot)$  deve ser o valor de  $f$ , porque indica o tipo de vibração e posteriormente o  $d$ , uma vez que assinala a intensidade da vibração escolhida (constante ou chaveamento perceptível). O tempo de pulso alto ( $t_{high}$ ) serve como elemento manipulador de  $d$ , tendo em vista que a variação dele, conservando o período ( $t$ ) influência diretamente na porcentagem do  $d$ .

Os tipos de vibração servem como base para o desenvolvimento das sensações táteis. Vibrações constantes simulam superfícies sem irregularidades, ou seja, a constância na pulsação indica texturas lisas. Ajustes feitos através da manipulação do  $d$  geram diferentes sensações com essa característica. Vibrações com chaveamento perceptível simulam superfícies com irregularidades. A sensação de batidas causada pela pulsação evidente pode ser manipulada para representar elementos como: rugosidade (grossa ou fina), gotejamento. A criação de diferentes sensações táteis com essa característica, pode ser feita por meio de mudanças na  $f$ .

Vibrações constantes têm a intensidade variada pela mudança na  $v_{apar}$ , acusada pela variação do  $d$ . Nas vibrações com chaveamento perceptível a variação do  $d$  não afeta a  $v_{apar}$ , mas sim, o tempo em que a vibração permanece sob a influência da  $v_{ref}$  antes de se tornar zero volts. A  $v_{ref}$  usada nos micromotores ROB-08449 da plataforma é o 3,3v da placa Arduino Mega 2560.

O valor de  $f$ , que é o limiar entre os dois modos de operação (constante e chaveamento perceptível), pôde ser encontrado de forma experimental, através de testes com os micromotores de vibração.

Nos experimentos realizados para este trabalho, primeiramente, foram atribuídos valores de  $f$  para um determinado  $d$  e logo após verificou-se a ocorrência de mudança no

tipo de vibração. Por meio da utilização desta técnica nos micromotores ROB-08449 da plataforma tátil proposta, constatou-se, de forma prática, que o valor de limiar é 50 Hz.

As principais características do limiar entre as formas de vibração são:  $f$  de 50 Hz e  $t$  de 20 ms. A experiência desenvolvida usou  $d$  de 50% durante os testes. O experimento começou com 12,5 Hz e 80 ms de  $f$  e  $t$ , respectivamente. Nesta configuração o tipo de vibração resultante foi chaveamento perceptível. Os testes continuaram reduzindo o  $t$  pela metade e dobrando a  $f$  em cada etapa. Ao final do experimento ficou notória a relação entre a diminuição do espaçamento entre os chaveamentos e as mudanças realizadas nos parâmetros ( $f$  e  $t$ ) do sinal PWM. De acordo com os resultados percebidos, vibrações constantes são dadas por  $f > 50$  Hz. As vibrações com chaveamento perceptível são geradas a partir de  $f$ , com a seguinte característica  $f < 50$  Hz.

Quando o tipo de vibração escolhido é chaveamento perceptível, o aumento excessivo do  $d$  faz com que a vibração se torne constante. Valores elevados de  $d$  tornam o  $t_{low}$  excessivamente curto, descaracterizando o chaveamento. No desenvolvimento de sensações táteis, o  $d$ , é usado para mudar a intensidade no modo de vibração escolhido. Nas vibrações, que geram sensações de batidas, o  $d$  muda a intensidade do chaveamento, mas também pode alterar o tipo de vibração (chaveada para constante). Constatou-se experimentalmente que o limiar desta mudança é dado por  $d = 97,5\%$ .

O experimento desenvolvido buscou observar os efeitos da mudança do  $d$  na vibração chaveada. Estes efeitos geram desde impactos na alteração do tempo entre os chaveamentos, até torná-los imperceptíveis. Na configuração inicial dos testes escolheu-se a frequência da vibração chaveada que iria fazer parte de todas as etapas do experimento, sendo ela  $f = 12,5$  Hz. No primeiro momento o valor escolhido para o ciclo de trabalho foi  $d = 50\%$ . Os valores seguintes foram  $d = 75\%$  e  $d = 93,75\%$ . Após a última etapa realizou-se alterações no valor de  $d$  por meio de ajuste fino. A mudança no tipo de vibração (chaveada para constante) ocorreu com o seguinte valor de ciclo de trabalho  $d = 97,5\%$ .

A modelagem de sensações táteis, deste trabalho, ocorreu de forma similar a metodologia apresentada em Muramatsu et al. (2013). Deste modo, a compreensão das sensações de tato aconteceu por meio dos parâmetros presentes na Figura 5 e as características delas foram associadas a padrões de vibração através da manipulação de sinais PWM.

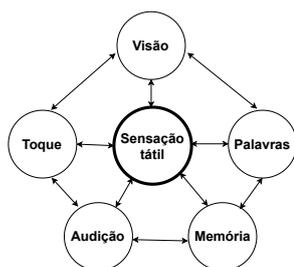


Figura 5. Parâmetros para extração de características de sensações táteis.

Considerando vibrações com chaveamento perceptível, um modo de operação habilitado por sinais com  $f < 50$  Hz. Em uma mesma  $f$  a constância de ocorrência dos chaveamentos não muda, independente da alteração em outros aspectos do sinal PWM. A variação do  $d$  influencia na intensidade (força) em que as sensações de batidas, causadas pela alternância entre os estados ligado e desligado dos micromotores, são percebidas. Ocorreu experimentalmente a identificação que a faixa frequência  $11,11 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$  é responsável por gerar chaveamentos, consideravelmente próximas, resultando na sensação de granulados pequenos. O aumento e redução da  $f$  dentro da faixa anteriormente citada, diminui a espessura da sensação de irregularidade e aumenta, respectivamente. Na faixa  $3,33 \text{ Hz} < f < 11,11 \text{ Hz}$  as sensações de batidas ainda são próximas e simulam granulados espessos. Por outro lado frequências compreendidas no intervalo  $f < 3,33 \text{ Hz}$  geram chaveamentos, consideravelmente, espaçados. No caso de  $d < 25\%$  é atribuída suavidade as vibrações no modo de chaveamento perceptível dentro desta faixa.

Considerando vibrações constantes, um modo de operação habilitado por sinais com  $f > 50$  Hz. As sensações táteis,  $s$ , possíveis de gerar com essa característica de vibração dependem da variação do  $d$ , ou seja, pode ser escolhida qualquer  $f$  dentro do intervalo citado. Vibrações constantes representam superfícies lisas e nesse caso  $d < 25\%$  indica texturas macias. A elevação do  $d$  é proporcional ao aumento da rigidez. A Figura 6 mostra um resumo dos tipos de sensações possíveis de gerar através de diferentes vibrações e as respectivas faixas de frequência.



Figura 6. Associação entre sensações táteis, vibrações e faixas de frequência.

No *feedback* vibratório a mudança de intensidade causada pelo  $d$  é útil para melhorar a percepção das sensações táteis. Na simulação de superfícies com irregularidades o  $t_{high}$  do sinal PWM, que é diferente da mudança causada por  $d$ , se configura como a largura do relevo (irregularidade) e o  $t_{low}$  como o espaçamento entre eles. A alteração entre o tipo de granulado presente na superfície pode ser feita variando  $f$  dentro da faixa  $11,11 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$  para gerar sensações táteis de irregularidades finas ou no intervalo  $3,33 \text{ Hz} < f < 11,11 \text{ Hz}$  no intuito de produzir sensações de irregularidades grossas.

Sinais PWM com frequências  $f < 3,33 \text{ Hz}$  simulam sensações táteis de contato espaçado. Neste tipo de sensação, interações com objetos geram chaveamentos com ocorrência, relativamente distante uma das outras, ou seja, não representam irregularidades. Este tipo de sinal indica

sensações similares a queda contínua de elementos sobre uma superfície de contato.

Vibrações constantes simulam superfícies lisas e nesses casos o  $d$  é responsável por variar o quão rígidas ou macias elas devem ser. Os parâmetros para sinais PWM gerarem vibrações constantes que simulam superfícies macias são  $f > 50$  Hz e  $d < 25\%$ .

Utilizando a mesma faixa de  $f$  e um intervalo de  $d$  invertido é possível produzir sensações de superfícies rígidas. Os parâmetros para esse tipo de vibração são  $f > 50$  Hz e  $d > 25\%$ . O grau de rigidez e maciez são regulados por  $d$ , e dentro das faixas, anteriormente, indicadas são gerados diferentes níveis dessas duas características das sensações táteis resultantes de vibrações constantes.

### 3. RESULTADOS

Conforme consta na Figura 7, as características do sinal PWM geram vibrações responsáveis por produzir sensações táteis transmitidas para a mão dos usuários da plataforma tátil, permitindo a realização de associações entre as sensações percebidas e as diferentes texturas virtualmente tocadas.

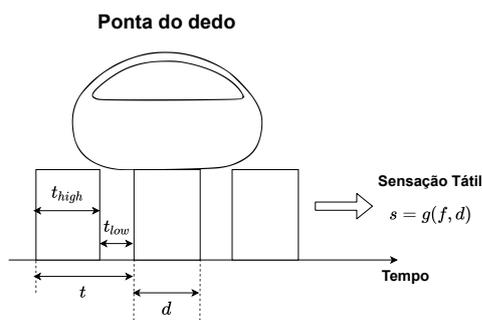


Figura 7. Sensações táteis de texturas virtuais, percebidas por meio de estímulos vibratórios.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros do sinal PWM responsáveis por gerar cada uma das sensações táteis modeladas para este trabalho.

Tabela 1. Sensações táteis modeladas

| Sensações táteis  | $t_{high}$ (ms) | $t_{low}$ (ms) | $d$ (%) | $f$ (Hz) |
|-------------------|-----------------|----------------|---------|----------|
| Rugosidade grossa | 45              | 94             | 32      | 7,2      |
| Rugosidade fina   | 22              | 42             | 34      | 15,6     |
| Lisura            | 2               | 1              | 67      | 333      |
| Gotejamento       | 100             | 500            | 17      | 1,7      |
| Suavidade         | 1               | 5              | 16,7    | 166,7    |

Os sinais PWM associados as sensações táteis,  $s$ , modeladas, foram analisados por meio de um osciloscópio conforme presente na Figura 8. A visualização dos sinais PWM ajudam a entender a relação entre as características deles e os detalhes das texturas que eles representam na forma de sensação tátil que deve ser transmitida para mão do operador da plataforma.

As sensações de rugosidade grossa e fina como presente, respectivamente, nas Figuras 9 e 10 possuem sinais PWM



Figura 8. Configuração para visualização dos sinais PWM relativos as sensações táteis.

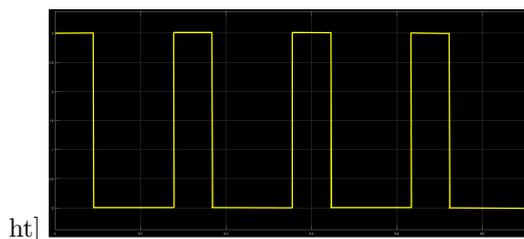


Figura 9. Sinal PWM da sensação tátil de rugosidade grossa.

de frequências próximas, mas diferentes o suficiente para tornar perceptível a diferença no ritmo da pulsação. Na rugosidade grossa a vibração simula sensações de batidas espaçadas com as seguintes características  $3,33$  Hz  $< f < 11,11$  Hz e  $s = g(7,2$  Hz;  $32\%)$ , de uma forma que o tempo de pulso alto,  $t_{high}$ , do atuador indica o tamanho do granulado (irregularidade) presente na superfície virtual, sendo ele maior que o da rugosidade fina, cujas características são descritas por  $11,11$  Hz  $< f < 50$  Hz e  $s = g(15,6$  Hz;  $34\%)$ . As sensações táteis de rugosidade grossa e fina se assemelham ao contato com pedregulhos de diferentes espessuras.

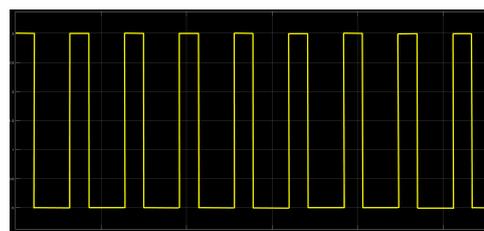


Figura 10. Sinal PWM da sensação tátil de rugosidade fina.

Texturas lisas são simuladas por vibrações constantes, sendo as características dela  $f > 50$  Hz,  $d > 25\%$  e  $s = g(333$  Hz;  $67\%)$ . Este tipo de sinal não representa relevos causados pelo chaveamento perceptível, uma vez que a vibração é uniforme. De acordo com a Figura 11, o sinal PWM da sensação tátil de lisura possui um valor de  $f$  e  $d$  elevados o suficiente para gerar uma vibração constante que resulta na simulação de uma superfície lisa e rígida. A sensação de lisura, modelada, indica o contato com materiais similares a madeira polida.

A sensação de gotejamento apresenta uma frequência baixa, conforme descrito pelas características  $f < 3,33$  Hz e  $s = g(1,7$  Hz;  $17\%)$ , que introduzem o efeito de chaveamento na vibração. Esta falta de uniformidade produz

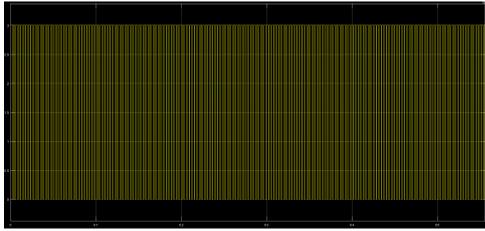


Figura 11. Sinal PWM da sensação tátil de lisura.

a sensação de contato espaçado de forma a simular a interação contínua com gotas. Esta característica simulada é possível de ser percebida pelo sinal PWM, presente na Figura 12, responsável por gerar a sensação de gotejamento, uma vez que os pulsos são suficientemente espaçados para isto.

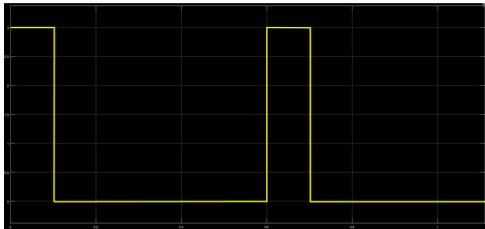


Figura 12. Sinal PWM da sensação tátil de gotejamento.

A sensação de suavidade tem como objetivo simular texturas, em que o contato com as superfícies virtuais é leve, por meio de pulsações fracas que possuem  $t_{high}$  curto e  $f$  alta de acordo com  $f > 50\text{ Hz}$ ,  $d < 25\%$  e  $s = g(166,7\text{ Hz}; 16,7\%)$ . No intuito de gerar este tipo de superfície, a vibração ocorre por um sinal PWM, presente na Figura 13, com  $t$  pequeno, de maior parte em  $t_{low}$ . Estas características geram uma sensação de vibração constante com intensidade baixa, ou seja, baixo valor de  $d$ . A sensação tátil de suavidade, simulada neste trabalho, se assemelha à experiência de passar os dedos sobre um algodão.

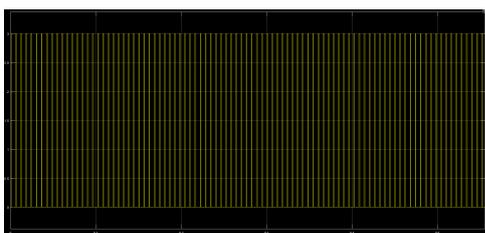


Figura 13. Sinal PWM da sensação tátil de suavidade.

Na Figura 14 é possível identificar o plano, do ambiente em que o SD está inserido, formado pelos eixos  $z$  e  $y$  que funciona como uma parede geradora de *feedback* tátil, ou seja, no momento em que a ferramenta do Phantom Omni toca pontos, específicos, dessa parede são simuladas sensações referentes a diferentes texturas. Conforme consta na Figura 14 existem cinco regiões relativas a cada uma das sensações táteis desenvolvidas, sendo elas: rugosidade grossa (RG), rugosidade fina (RF), lisura (L), gotejamento (G), e suavidade (S). O contato com estas posições é suficiente para estimular o acionamento dos atuadores presentes no MD, responsáveis por simular a interação com diferentes texturas. Movimentações externas as regiões

referentes aos retornos táteis resultam no desligamento dos micromotores de vibração e dessa forma representa a ausência de interação com as regiões das texturas.

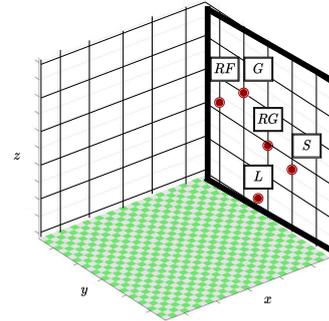


Figura 14. Plano com as regiões referentes as texturas

Na Figura 15 são apresentadas as direções em que a ferramenta do SD, aponta para poder chegar as regiões relativas as diferentes texturas. Cada um dos pontos presentes na Figura 14, conforme associado pela Tabela 2, pertencem a uma das direções, ou seja, se o Phantom Omni tocar a posição centralizada do plano sob análise, o *feedback* simulado será: rugosidade grossa. Movimentações com direção Oeste, possibilitam chegar na região referente a textura: rugosidade fina. Ao levar a ferramenta do SD para a direção Sul do plano  $z$  e  $y$ , do ambiente explorado, torna-se possível retornar a sensação tátil de lisura. Levantado o manipulador robótico até o ponto mais elevado do plano, chega-se a direção Norte, sendo ela responsável por conter a textura relativa a sensação de gotejamento. Por fim, na direção Leste está presente a região referente a sensação de suavidade.

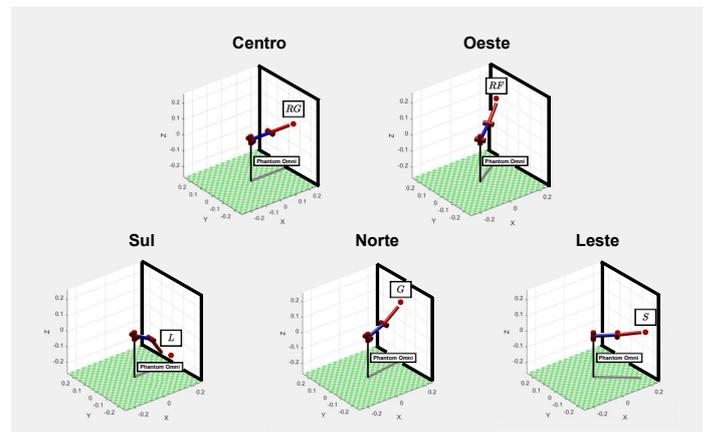


Figura 15. Contato do SD com as regiões das texturas

Tabela 2. Localização das texturas e identificador

| Direção | Textura           | $x$  | $y$   | $z$  | Id |
|---------|-------------------|------|-------|------|----|
| Centro  | Rugosidade grossa | 0,1  | 0,1   | 2,09 | 1  |
| Oeste   | Rugosidade fina   | -0,6 | 0,3   | 0,79 | 2  |
| Sul     | Lisura            | 0,5  | -0,85 | 1,46 | 3  |
| Norte   | Gotejamento       | 0,34 | 0,62  | 2,09 | 4  |
| Leste   | Suavidade         | 2,07 | 0,27  | 2,29 | 5  |

## 4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma plataforma de teste em tempo real para aplicações em internet tátil. A plataforma permite a interação tátil de um operador humano, através de uma luva tátil, com objetos, de diferentes texturas, através de um robô manipulador do tipo Phantom Omni, simulado através da plataforma Matlab-Simulink. Os resultados mostram que a plataforma permite emular vários tipos de sensações viabilizando o teste de vários algoritmos e técnicas associadas a internet tátil. A plataforma de teste aqui proposta pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de novas estratégias para minimizar os problemas associados a internet tátil.

## AGRADECIMENTOS

O trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

## REFERÊNCIAS

- Aijaz, A. (2016). Towards 5g-enabled tactile internet: Radio resource allocation for haptic communications. In *2016 IEEE wireless communications and networking conference workshops (WCNCW)*, 145–150. IEEE.
- Aijaz, A., Dohler, M., Aghvami, A.H., Friderikos, V., and Frodigh, M. (2016). Realizing the tactile internet: Haptic communications over next generation 5g cellular networks. *IEEE Wireless Communications*, 24(2), 82–89.
- Arjun, N., Ashwin, S., Polachan, K., Prabhakar, T., and Singh, C. (2018). An end to end tactile cyber physical system design. In *2018 4th International Workshop on Emerging Ideas and Trends in the Engineering of Cyber-Physical Systems (EITEC)*, 9–16. IEEE.
- Dohler, M. and Fettweis, G. (2015). *The tactile Internet-IoT, 5G and cloud on steroids*. IET.
- D’Abbraccio, J., Massari, L., Prasanna, S., Baldini, L., Sorgini, F., Airò Farulla, G., Bulletti, A., Mazzoni, M., Capineri, L., Menciassi, A., et al. (2019a). Haptic glove and platform with gestural control for neuromorphic tactile sensory feedback in medical telepresence. *Sensors*, 19(3), 641.
- D’Abbraccio, J., Massari, L., Prasanna, S., Baldini, L., Sorgini, F., Airò Farulla, G., Bulletti, A., Mazzoni, M., Capineri, L., Menciassi, A., et al. (2019b). Haptic glove and platform with gestural control for neuromorphic tactile sensory feedback in medical telepresence. *Sensors*, 19(3), 641.
- Fettweis, G.P. (2014). The tactile internet: Applications and challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 9(1), 64–70.
- Junior, J.C., Torquato, M.F., Mahmoodi, T., Dohler, M., and Fernandes, M.A. (2020). Reconfigurable computing applied to latency reduction for the tactile internet. *arXiv preprint arXiv:2003.12463*.
- Junior, J.C., Torquato, M.F., Noronha, D.H., Silva, S.N., and Fernandes, M.A. (2019). Proposal of the tactile glove device. *Sensors*, 19(22), 5029.
- Li, C., Li, C.P., Hosseini, K., Lee, S.B., Jiang, J., Chen, W., Horn, G., Ji, T., Smee, J.E., and Li, J. (2018). 5g-based systems design for tactile internet. *Proceedings of the IEEE*, 107(2), 307–324.
- Lin, B.S., Lee, I., Yang, S.Y., Lo, Y.C., Lee, J., Chen, J.L., et al. (2018). Design of an inertial-sensor-based data glove for hand function evaluation. *Sensors*, 18(5), 1545.
- Lobo, J. and Trindade, P. (2013). Inerttouchhand system-ith-demonstration of a glove device with distributed inertial sensors and vibro-tactile feedback. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 9(S8), 56–58.
- Meryem, S., Adnan, A., and Mischa, D. (2016). The 5g-enabled tactile internet: Applications, requirements, and architecture. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 1–6.
- Muramatsu, Y., Niitsuma, M., and Thomessen, T. (2013). Building a cognitive model of tactile sensations based on vibrotactile stimuli. In *2013 IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications (CogInfoCom)*, 149–154. IEEE.
- Nasrallah, A., Thyagaturu, A.S., Alharbi, Z., Wang, C., Shao, X., Reisslein, M., and ElBakoury, H. (2018). Ultra-low latency (ull) networks: The ieee tsn and ietf detnet standards and related 5g ull research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(1), 88–145.
- Oteafy, S.M. and Hassanein, H.S. (2018). Leveraging tactile internet cognizance and operation via iot and edge technologies. *Proceedings of the IEEE*, 107(2), 364–375.
- Spence, C. (2003). Crossmodal attention and multisensory integration: implications for multimodal interface design. In *Proceedings of the 5th international conference on Multimodal interfaces*, 3–3.
- Weber, P., Rueckert, E., Calandra, R., Peters, J., and Beckerle, P. (2016). A low-cost sensor glove with vibro-tactile feedback and multiple finger joint and hand motion sensing for human-robot interaction. In *2016 25th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 99–104. IEEE.
- Yang, D. and Choi, Y. (2018). Palm glove: wearable glove based on palm-camera for thumb-to-finger tap recognition. In *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 549–551. IEEE.