

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**MÉTODO DE CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE ATUADORES IPMC
BASEADOS EM NAFION® UTILIZANDO TÉCNICA DE VISÃO DE MÁQUINA
EM AMBIENTE COM UMIDADE RELATIVA CONTROLADA**

Ariel Gustavo Zuquello

São Carlos-SP
2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

**MÉTODO DE CONTROLE DE TRAJETÓRIA DE ATUADORES IPMC
BASEADOS EM NAFION® UTILIZANDO TÉCNICA DE VISÃO DE MÁQUINA
EM AMBIENTE COM UMIDADE RELATIVA CONTROLADA**

Ariel Gustavo Zuquello

Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Orientador: Dr. Carlos Henrique Scuracchio

Coorientador: Dr. Laos Alexandre Hirano

Agência Financiadora: CAPES/DINTER processo 23038.021524/2016-88.

São Carlos-SP

2021

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Valcir e Leonélia, irmã Dayana, filhos, Ana e Caio e esposa Miriele que sempre estiveram ao meu lado durante essa caminhada.

VITAE DO CANDIDATO

Mestre em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Maringá (2015), Tecnólogo em Informática, pela Universidade Paranaense (2006)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Ariel Gustavo Zuquello, realizada em 13/08/2021.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Carlos Henrique Scuracchio (UFSCar)

Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento (UFSCar)

Prof. Dr. Juliano Marini (UFSCar)

Prof. Dr. Luciano Luiz Silva (Unochapecó)

Prof. Dr. Márcio Antônio Fiori (Unochapecó)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.
O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento especial ao meu orientador Carlos Henrique Scuracchio que juntamente com o meu coorientador Laos Alexandre Hirano foram os principais pilares para realização deste trabalho e estiveram comigo em todos os momentos. Muito, mas muito obrigado!

Ao Magnífico Reitor da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), professor Dilmar Baretta, pelo apoio no enfrentamento desse desafio.

Aos meus amigos do DINTER, em especial aos que conviveram diretamente comigo durante essa jornada, Tiago de Sá Gomes, que comigo, estudou muitas vezes em sábados e domingos chuvosos; Ademar Tibola, que, com sua disciplina, honestidade e generosidade, me fez crescer como ser humano; Murilo César Costelli que aprendi a admirar, uma pessoa ímpar. Aos demais, também estendo aqui meus agradecimentos.

Ao grupo de pesquisa SMART, o qual, me acolheu, ajudou e hoje vejo que fiz amigos: Kaique Afonso Tozzi, Rafael Barbosa, Roger Gonçalves e em especial Matheus Colovati Saccardo, nem sei expressar tamanha gratidão.

Aos professores, técnicos e demais colaboradores da UFSCAR e UNOCHAPECÓ que viabilizaram a realização do DINTER.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro para realização deste trabalho com bolsa de estudos, processo nº 23038.021524/2016-88.

A ti, minha amiga, namorada e esposa Miriele Favero, que, com todo seu carinho e amor, sempre me apoiou, até nos momentos mais difíceis. Divido contigo esta conquista.

RESUMO

Compósitos Ionoméricos de Polímero-Metal (IPMC) consistem em uma matriz polimérica eletroativa revestida em ambos os lados por um metal nobre. Ao aplicar uma diferença de potencial elétrico, a membrana polimérica sofre uma alteração em sua espessura, causando uma deformação. Além disso, este tipo de dispositivo possui características, como, baixo peso, flexibilidade e biocompatibilidade. Portanto, como atuadores, os IPMCs são uma boa escolha para aplicações, como por exemplo, na robótica e biomedicina. No entanto, apresentam algumas desvantagens, como relaxação reversa (tendência ao deslocamento no sentido contrário ao definido depois de algum tempo de atuação) e comportamentos não lineares provenientes do nível de hidratação da membrana polimérica. Por esses motivos, controlar e descrever as respostas mecânicas desses dispositivos têm sido um desafio. Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema e instrumentação eficaz para controlar e caracterizar atuadores IPMCs sob condições variáveis de umidade e de contra-íon. Para isso, utilizou-se um controlador PI (Proporcional e Integral) de malha fechada integrado a um algoritmo de visão de máquina. Nessa abordagem, uma *webcam* é responsável por rastrear o movimento do atuador. Contudo, foi necessário realizar algumas caracterizações morfológicas e elétricas prévias para compreender as propriedades e com isso determinar qual a melhor condição de controle de um atuador IPMC. Dentre elas, capacidade de adsorção de água, microscopia eletrônica de varredura, método quatro pontas, espectroscopia de impedância e cronoamperometria. Todo o sistema opera simultaneamente e é controlado em tempo real pelo LabView. Os resultados apresentados comprovam que o método desenvolvido neste trabalho foi eficaz contornando o fenômeno da relaxação reversa além de ser possível correlacionar parâmetros de controle com propriedades do material.

Palavras-chave: IPMC; Controle; Visão de Máquina; Umidade Controlada

ABSTRACT

TRAJECTORY CONTROL METHOD OF NAFION®-BASED IPMC ACTUATORS USING MACHINE VISION TECHNIQUE AT CONTROLLED RELATIVE HUMIDITY ENVIRONMENT

Ionomeric polymer-metal composites (IPMC) consist of an electroactive polymeric matrix coated on both sides with a noble metal. When applying an electrical potential difference, the polymeric membrane changes its thickness, causing a deformation. In addition, this type of device has features such as low weight, flexibility, and biocompatibility. Therefore, as actuators, IPMCs are a good choice for applications such as robotics and biomedicine. However, they have some disadvantages, such as reverse relaxation (tendency to shift in the opposite direction to that defined after some time of operation) and non-linear behavior arising from the hydration level of the polymeric membrane. For these reasons, controlling and describing the mechanical responses of these devices has been a challenge. Therefore, the overall objective of this study was to develop an effective system and instrumentation to control and characterize IPMC actuators under varying moisture and counter-ion conditions. A closed-loop PI controller (Proportional and Integral) aggregate with a machine vision algorithm was used. In this approach, a webcam is responsible for tracking the actuator's movement. However, it was necessary to perform some morphological and electrical characterizations beforehand to understand the properties and thus determine the best control condition for an IPMC actuator. Among them, water adsorption capacity, scanning electron microscopy, four probe method, impedance spectroscopy, and chronoamperometry. The entire system operates simultaneously and is controlled in real-time by LabView. The results prove that the system developed in this study effectively circumventing the reverse relaxation phenomenon and correlating control parameters with material properties.

Keywords: IPMC; Control; Machine Vision; Controlled Humidity

PUBLICAÇÕES

- SACCARDO M. C.; ZUQUELLO A. G.; GONÇALVES R.; TOZZI K. A.; BARBOSA R., HIRANO L. A.; SCURACCHIO C. H. Electromechanical Evaluation of Ionomeric Polymer-Metal Composites Using Video Analysis. *Materials Research*. 2021; 24(Suppl 2): e20210317
- SACCARDO M. C.; ZUQUELLO A. G.; TOZZI K. A.; GONÇALVES R.; HIRANO L. A.; SCURACCHIO C. H. Counter-ion and humidity effects on electromechanical properties of Nafion®/Pt composites. *Mater Chem Phys*. 2020;244.
- GONÇALVES R.; TOZZI K. A.; SACCARDO M. C.; ZUQUELLO A. G.; SCURACCHIO C. H. Nafion-based ionomeric polymer/metal composites operating in the air: theoretical and electrochemical analysis. *J Solid State Electrochem*. 2020;24(8):1845–56.
- ZUQUELLO, A. G.; SACCARDO, M. C.; GONCALVES, R.; SCURACCHIO, C. H.; HIRANO, L. A. Avaliação de desempenho eletromecânico de filmes de IPMC à base de Nafion® utilizando correlação de imagens. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 2019, Bento Gonçalves. Anais do 15º Congresso Brasileiro de Polímeros/Associação Brasileira de Polímeros. São Carlos: ABPol, 2019., 2019.
- SACCARDO, M. C.; ZUQUELLO, A. G.; GONCALVES, R.; HIRANO, L. A.; SCURACCHIO, C. H.; DARDIS, T. P. Influência do contra-íon e umidade relativa na cinética de absorção de água pelo nafion e compósito de polímero ionomérico e metal. In: Congresso Brasileiro de Polímeros, 2019, Bento Gonçalves. Anais do 15º Congresso Brasileiro de Polímeros/Associação Brasileira de Polímeros. São Carlos: ABPol, 2019., 2019.

SUMÁRIO

	Pág.
FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT.....	vii
PUBLICAÇÕES	ix
SUMÁRIO	xi
ÍNDICE DE TABELAS.....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 Polímeros Eletroativos	7
2.2 Compósitos de Polímero Ionomérico e Metal (IPMCs)	7
2.3 Morfologia do Nafion®	12
2.3.1 Influência da UR e do contra-íon no comportamento do IPMC.....	17
2.3.2 Mecanismos de transporte do contra-íon	18
2.4 Sistemas de Controle	20
2.4.1 Sistemas de Controle em Malha Aberta	20
2.4.2 Sistemas de Controle em Malha Fechada	21
2.5 Controle do IPMC.....	22
2.5.1 Controlador PID	22
2.5.1.1 Variações do atuador IPMC	27
2.5.1.2 Sensoriamento do atuador IPMC	28
2.5.2 Sintonia de controlador	31
2.5.3 Técnicas de visão computacional no controle do IPMC.....	32
2.5.3.1 Visão Computacional	33
2.5.3.2 Visão de máquina.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Materiais	39

3.2 Métodos	40
3.2.1 – Obtenção das amostras de IPMC.....	41
3.2.2 – Incorporação do contra-íon	42
3.3 Aparato Experimental.....	42
3.3.1 – Montagem do <i>Hardware</i> para o Sistema de Controle de UR.	43
3.3.2 – Desenvolvimento do <i>Software</i> para o Sistema de Controle de UR	44
3.3.3 – Montagem do <i>Hardware</i> para o controle do IPMC.....	45
3.3.4 – Desenvolvimento do <i>Software</i> para o controle de trajetória do IPMC ..	46
3.3.4.1 Sintonia do controlador	49
3.4 Métodos de Caracterização	51
3.4.1 Estudo da absorção de água.....	51
3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	52
3.4.3 Caracterização elétrica.....	53
3.4.3.1 Método quatro pontas	53
3.4.3.2 Espectroscopia de impedância (EIS).....	54
3.4.3.3 Cronoamperometria	55
3.4.4 Correlação entre controle de trajetória e propriedades do IPMC	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1 Índice de acerto do algoritmo	57
4.2 Estudo de Absorção de Água.....	58
4.3 Caracterização Morfológica.....	61
4.4 Caracterização Elétrica	66
4.4.1 Método quatro pontas	67
4.4.2 Espectroscopia de Impedância (EIS)	69
4.4.2.1 Gráfico de Nyquist.....	69
4.4.2.2 Gráfico de Bode	74
4.4.3 Cronoamperometria	79
4.5 Controle de Trajetória de IPMC.....	86
4.5.1 Controle de trajetória do IPMC-Li.....	86
4.6 Análise de Estabilidade do Controle PI	94
4.6.1 Estabilidade do controlador para o atuador IPMC-Li em UR = 90% com variações na DDP	94

4.6.1.1 Resposta elétrica do controlador no ensaio de estabilidade para o IPMC-Li.....	96
4.6.1.2 Comportamento da corrente elétrica na estabilidade do controlador ...	99
4.6.2 Estabilidade do controlador para o atuador IPMC-Li em UR's.....	101
4.6.3 Estabilidade do sistema de controle trocando o contra-íon	108
4.6.3.1 Estabilidade no sistema de controle com o contraíon H ⁺	108
4.6.3.2 Estabilidade no sistema de controle com o contraíon Na ⁺	113
4.6.3.3 Estabilidade no sistema de controle com o contraíon K ⁺	118
4.7 Análise na Performance do Controlador PI	123
4.7.1 Performance do sistema de controle para o atuador IPMC-Li	123
4.7.1.1 Performance do sistema de controle em diferentes UR's	123
4.7.1.2 Resposta elétrica do sistema de controle para o atuador IPMC-Li	130
4.7.1.3 Resposta da corrente elétrica do IPMC-Li	136
4.7.2 Performance do sistema de controle com diferentes contra-íons	140
4.7.2.1 Resposta elétrica do atuador com diferentes contra-íons.....	142
4.7.2.2 Resposta da corrente elétrica consumida pelo atuador com diferentes contra-íons	143
4.7.2.3 Influência da UR na performance do atuador IPMC	151
4.8 Correlação entre Controle de Trajetória e Propriedades do IPMC.....	161
5 CONCLUSÃO	165
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	167
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169
APÊNDICE A	187
APÊNDICE B	191
APÊNDICE C	193
APÊNDICE D	195
APÊNDICE E	203

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 2.1 - Reações envolvidas na deposição primária pelo método de Oguro	10
Tabela 2.2 - Fórmulas do método 2 de ZN.....	32
Tabela 3.3 - Propriedades físicas do Nafion 117 ^a [143].....	39
Tabela 4.4 - Relação entre raio iônico e tempo para equilíbrio osmótico.....	60
Tabela 4.5 - Resultado do ensaio de quatro pontas.	68
Tabela 4.6 - Resultado do ensaio de Cronoamperometria em UR = 30%	80
Tabela 4.7 - Resultado do ensaio de Cronoamperometria em UR = 60%	82
Tabela 4.8 - Resultado do ensaio de Cronoamperometria em UR = 90%	84
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de controle de trajetória para o IPMC-Li ⁺	92
Tabela 4.10 - Sumarização dos resultados do ensaio IPMC-Li	106
Tabela 4.11- Sumarização dos dados para IPMC-H	111
Tabela 4.12 – Sumarização dos dados IPMC-Na.....	117
Tabela 4.13 – Sumarização dos dados do IPMC-K.....	121
Tabela 4.14 – Dados sumarizados do ensaio realizados com todos os contra- íons.....	122
Tabela 4.15 - Perda de performance IPMC-Li	126
Tabela 4.16 - Dados do comportamento dos picos da DDP para manter a trajetória desejada.....	136
Tabela 4.17 - Correlação entre parâmetros de controle a contra-íon recomendado.....	162

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Mecanismo de atuação do IPMC [29].	8
Figura 2.2 - a) Estrutura química do Nafion® 117. b) representação morfológica da matriz polimérica hidratada (C ⁺ = contra-íon) [24].	10
Figura 2.3 - Formação de eletrodos dendríticos [24].	11
Figura 2.4 - Fórmula estrutural do Nafion®	12
Figura 2.5 - Representação do modelo de Gierke [32].	14
Figura 2.6 - Modelo estrutural trifásico do Nafion®: a) CF ₂ ; b) zona interfacial; c) aglomerados [50]	14
Figura 2.7 - Morfologia do Nafion® hidratado [51].	16
Figura 2.8 - Sistema de controle em Malha Aberta [68].	21
Figura 2.9 - Sistema de controle em Malha Fechada [68].	22
Figura 2.10 - Resposta típica de um sistema PID de malha fechada [104].	24
Figura 2.11 - Método de busca do modelo na imagem de inspeção [142].	36
Figura 2.12 - Exemplo de aparato experimental para monitorar e controlar IPMC	37
Figura 2.13. a) imagem de inspeção; b) modelo; c) modelo encontrado	38
Figura 3.14 - Aparato Experimental utilizado.	40
Figura 3.15 - Fluxograma dos métodos envolvidos durante a realização do trabalho.	41
Figura 3.16 - Obtenção do IPMC.	41
Figura 3.17 - Fluxograma detalhado do aparato experimental	43
Figura 3.18 - Hardware montado do sistema de controle de UR	44
Figura 3.19 - Câmera utilizada para realização dos ensaios e suporte do IPMC.	46
Figura 3.20 - Integração entre sistemas de visão de máquina e controle PI.	47
Figura 3.21 - Painel frontal do sistema desenvolvido sem a marcação na ponta do IPMC	48
Figura 3.22 - Painel frontal do sistema desenvolvido com a marcação na ponta do IPMC	48
Figura 3.23 - Ensaio para sintonia de controle	49

Figura 3.24 - Fluxograma com sequência das caracterizações realizadas.....	51
Figura 3.25 -Diagrama de um modelo simplificado de Randles, adaptado de [152]......	55
Figura 4.26 - Ensaio para validar uso/não uso da marcação na ponta do IPMC	57
Figura 4.27 – Percentual de aumento de massa pelo IPMC.....	59
Figura 4.28 – Ganho de massa em função do tempo.....	60
Figura 4.29 - Morfologia superficial e mapa químico da amostra de IPMC produzida.	61
Figura 4.30 – Tamanho médio dos grãos de platina na superfície do IPMC....	62
Figura 4.31 – Visão lateral do IPMC.....	63
Figura 4.32 – Região de interface polímero/metal em diferentes pontos do IPMC	64
Figura 4.33 - Representação esquemática e imagem real dos pontos avaliados no MEV.	65
Figura 4.34 - a) IPMC antes da atuação; b) IPMC-H depois de 18h de atuação; c) IPMC-Li depois de 18h de atuação [52]	66
Figura 4.35 - IPMCs obtidos ao final da etapa de preparação com dimensões de aproximadamente 30mm x 3mm.	67
Figura 4.36 - Representação do ensaio quatro pontas.	67
Figura 4.37 - Graficos de Nyquist, a) Região de alta e média frequência, b) região de difusão (baixa frequência), c) detalhes da resposta indutiva do IPMC-H ⁺ . em UR = 90%.	69
Figura 4.38 - Mecanismo de transporte estrutural (Grotthuss) e veicular	70
Figura 4.39 - Graficos de Nyquist, a) Região de alta e média frequência, b) detalhes da resposta do IPMC-H ⁺ em UR = 60%.	72
Figura 4.40 - Graficos de Nyquist em UR = 30%.....	73
Figura 4.41 - Gráfico de Bode - Módulo da impedância em função da frequência para todos os contra-íons em diferentes UR's.....	74
Figura 4.42 - Gráfico de Bode - Ângulo de fase em função da frequência para todos os contra-íons em diferentes UR's.....	77
Figura 4.43 - Cronoamperometria em UR = 30%	80

Figura 4.44 - Cronoamperometria em UR = 60%	82
Figura 4.45 - Cronoamperometria em UR = 90%	83
Figura 4.46 - Aumento da carga elétrica acumulada em função da UR.....	85
Figura 4.47 – Deslocamentos registrados a partir da webcam no controle de trajetória com UR = 90% para o IPMC-Li ⁺	87
Figura 4.48 - Deslocamentos registrados a partir da webcam no controle de trajetória com UR = 60% para o IPMC-Li ⁺	89
Figura 4.49 - Deslocamentos registrados a partir da webcam no controle de trajetória com UR = 30% para o IPMC-Li ⁺	91
Figura 4.50- Variação da trajetória do IPMC em relação a DDP aplicada.	95
Figura 4.51 - Resposta elétrica durante os ensaios – a) 1; b) 1,5; c) 2 volts em UR = 90%.	98
Figura 4.52 - Resposta da corrente elétrica consumida durante o ensaio de estabilidade em UR = 90% para a) 1; b) 1,5 e; c) 2 volts	100
Figura 4.53 - Estabilidade do controlador em diferentes UR's para DDP = 1 volt; a) detalhe ajuste posição direita; b) detalhe no ajuste da posição esquerda..	102
Figura 4.54 - Estabilidade do controlador em diferentes UR's para DDP = 1,5 volts; a) detalhe ajuste posição direita; b) detalhe no ajuste da posição esquerda.	103
Figura 4.55 - Estabilidade do controlador em diferentes UR's para DDP = 2 volts; a) detalhe ajuste posição direita; b) detalhe no ajuste da posição esquerda..	104
Figura 4.56 – Comportamento do IPMC sob ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-H em UR = 90%.....	109
Figura 4.57 - Comportamento do IPMC sob ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-H em UR = 60%.....	110
Figura 4.58 - Comportamento do IPMC sob ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-H em UR = 30%.....	111
Figura 4.59 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-Na em UR = 90%	113
Figura 4.60 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-Na em UR = 60%	114

Figura 4.61 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-Na em UR = 30%	116
Figura 4.62 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-K em UR = 90%.	118
Figura 4.63 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-K em UR = 60%	119
Figura 4.64 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-K em UR = 30%	120
Figura 4.65 – Deslocamento do atuador sob ação de controle no ensaio de performance; a) = 90%/ b) = 60%; c) = 30%.	125
Figura 4.66 - Resposta do atuador IPMC-Li frente a variações da DDP.....	130
Figura 4.67 - Resposta do atuador IPMC-Li na DDP = 1 volt	131
Figura 4.68 - Resposta do atuador IPMC-Li na DDP = 1,5 volts.....	133
Figura 4.69 - Picos de DDP na resposta do atuador IPMC-Li com DDP = 1,5 volts	134
Figura 4.70 - Resposta do atuador IPMC-Li na DDP = 2 volts	135
Figura 4.71 - Resposta de corrente sob a entrada de DDP = 1(a), 1,5 (b) e 2 volts (c).	138
Figura 4.72 - Influência do contra-íon na performance do controlador em UR = 90%; a) e c) detalhes do primeiro e sétimo deslocamento direita; b) e d) detalhes do primeiro e sétimo deslocamento esquerda.	140
Figura 4.73 - Resposta elétrica do atuador com diferentes contra-íons em UR = 90%	142
Figura 4.74 - Corrente elétrica consumida com diferentes contra-íons.....	144
Figura 4.75 - Picos e pós picos da corrente consumida pelo IPMC-H (no detalhe da Figura 4.71).....	145
Figura 4.76 - Picos de tensão IPMC-H para análise de eletrólise.....	146
Figura 4.77 - Picos da corrente consumida pelo IPMC-Na (no detalhe da Figura 4.67)	147
Figura 4.78 - Picos de tensões do IPMC-Na no ensaio de performance.	148
Figura 4.79 - Picos da corrente consumida pelo IPMC-K.	149
Figura 4.80 - Picos de tensão IPMC-K para análise de eletrólise.....	150

Figura 4.81 - Comportamento dos diferentes contra-íons na performance do sistema de controle em UR = 60%.	151
Figura 4.82 - Resposta da DDP no ensaio de performance apresentado na Figura 4.81.....	153
Figura 4.83 - Resposta da corrente consumida pelo atuador no ensaio de performance, ilustrado na Figura 4.81	154
Figura 4.84 - Comportamento dos diferentes contra-íons na performance do sistema de controle em UR = 30%.	156
Figura 4.85 - Resposta da DDP no ensaio de performance	157
Figura 4.86 - Resposta da corrente elétrica consumida durante o ensaio de performance.....	159
Figura 4.87 – Corrente elétrica consumida em função da UR para vários contra-íons.....	160
Figura B.88- Painel frontal do sistema de controle desenvolvido.....	193
Figura B.89 - Software de reconhecimento de padrões.....	194
Figura B.90 - Fluxograma do software de reconhecimento de padrões e controle.	195
Figura B.91 - Parte do software responsável por tirar foto	197
Figura B.92 - Parte do software responsável por aprender o modelo.....	198
Figura B.93 - Parte do software responsável por procurar o modelo criado..	200
Figura B.94 - Parte do software responsável por parar o software.	201
Figura D.95 - Representação da configuração do PID no sistema de controle	203

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Ângstron
BW	Bouc-Wen
C	Coulomb
CDC	Capacitância de dupla camada
CLP	Controlador lógico programável
cm	Centímetro
CUDA	Arquitetura de dispositivo de computação unificada
DFT	Teoria da densidade funcional
DMA	Análise dinâmico - mecânica
DOF	Graus de liberdade
DPD	Dinâmica de partículas com dissipação
EIS	Espectroscopia de impedância
G´	Módulo de armazenamento
G´´	Módulo de perda
GPU	Unidade de processamento gráfico
Hz	Hertz
IHP	Plano helmholtz interno
K_{cr}	Ganho crítico
K_d	Ganho derivativo
kHz	Quilohertz
K_i	Ganho integral
K_p	Ganho proporcional
kV	Quilovolts
kΩ	Quiloohm
mA	Miliampere

MEV	Microscopia eletrônica de varredura
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro por segundo
NI	National Instruments
nm	Nanômetro
°C	Graus celsius
OHP	Plano Helmholtz Externo
P_{cr}	Período crítico
pH	Potencial hidrogeniônico
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PIP	Proporcional Integral Plus
PTFE	Politetrafluoretileno
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
RC	Resistivo capacitivo
RSE	Resistencia em série equivalente
R_{tc}	Resistência de transferência de carga
s	Segundo
S	Siemens
SAXS	Espalhamento de raio-X de baixo ângulo
T_d	Tempo derivativo
T_i	Tempo integral
UR	Umidade relativa
V	Volts
Ω	Ohm
μF	Microfaraday

μH microhenry

μm micrômetro

1 INTRODUÇÃO

Compósitos de Polímero Ionomérico e Metal (IPMC) são uma classe de materiais derivados dos polímeros eletroativos. Sua morfologia compreende uma matriz polimérica, geralmente Nafion®, revestida em ambos os lados por um metal nobre (comumente platina ou ouro) atuando como eletrodos. Esses materiais são considerados materiais inteligentes e as aplicações potenciais são inúmeras, da robótica até a biomedicina.

O mecanismo de operação desses dispositivos consiste na migração de íons hidratados dentro dos canais ionoméricos em resposta a um campo elétrico gerado após uma aplicação de uma diferença de potencial nos eletrodos metálicos [1]. Esse movimento iônico causa um gradiente de pressão interna, levando a um acúmulo de massa anisotrópica, o que faz com que o dispositivo se dobre [2]. Portanto, vários fatores influenciam o desempenho mecânico, como a dependência do ambiente operacional (temperatura e umidade), o tipo de contra-íon [3], as dimensões da membrana polimérica (especialmente a espessura) e as propriedades físicas do eletrodo [4].

Devido às interações entre propriedades químicas, elétricas e mecânicas, o comportamento do IPMC requer um modelo de atuação não linear para explicá-lo [5]. Outros fenômenos também observados são a relaxação reversa, eletrólise e dinâmica altamente incerta e não linear [6]. A relaxação reversa, por exemplo, ocorre devido às forças de difusão que atuam no solvente dentro da membrana de troca iônica. Este efeito pode levar a um erro de posicionamento significativo e evitar que os atuadores IPMC sejam usados com precisão em aplicações de baixa frequência.

Em outras palavras, esses dispositivos possuem variações e instabilidades no desempenho eletromecânico, apresentando não linearidades e comportamentos de variação de tempo [7]. Além disso, o controle desses dispositivos se tornou uma tarefa difícil e complexa de se realizar, já que para utilizá-lo em uma aplicação prática é necessário controlá-lo.

Por essa razão, uma das formas de se controlar um IPMC é acoplando-o a um sistema de controle para aplicações de atuadores robóticos [8], como um

controlador Proporcional Integral e Derivativo (PID) [9]. Alguns autores demonstraram a capacidade de controlar efetivamente os dedos robóticos [10], o robô macio [11], os músculos artificiais [12], [13], os atuadores musculares pneumáticos [14], a tensão de saída [15], a força resultante [16], a posição desejada [17], e microbombas [18], usando controladores PID.

Khawwaf et al. [19] projetaram um controlador PID para rastrear o deslocamento do IPMC em condições subaquáticas. Apresentaram um simples controlador PID, no qual os ganhos foram obtidos via tentativa e erro. Kim et al. [20] empregaram um algoritmo de aprendizagem para projetar um controlador PID e obter ganhos adequados de PID. Os autores descreveram precisamente a resposta mecânica do IPMC em condição seca. Liao et al. [21] propuseram um projeto de controle de rastreamento robusto PI para um IPMC usando uma abordagem de otimização de fatoração coprima para determinar o parâmetro do controlador PI. Wang et al. [22] transformaram sistemas simples e sofisticados de controle PI com visão de máquina como um sensor de feedback.

Em geral, esses controladores provaram ser um método eficaz, capaz de garantir o bom funcionamento e confiabilidade do sistema. Eles também podem rastrear a posição com precisão, eliminar erros de estado estacionário, executar efetivamente sob uma operação estática ou de baixa frequência e ter desempenho altamente ajustável. No entanto, como qualquer método, há sempre lacunas para novos ajustes. Uma lacuna que motivou o desenvolvimento deste estudo para produzir resultados inéditos é considerar as instabilidades causadas pelos fatores externos que influenciam o desempenho mecânico do IPMC, como a umidade relativa do ar (UR), além de avaliar a influência do contra-íons e da diferença de potencial (DDP) no comportamento sob flexão do atuador IPMC ao ser controlado.

Uma vez que a operação e a frequência de resposta dos IPMCs são baixas, um controlador PI é suficiente para garantir o funcionamento e a confiabilidade do sistema. Assim, neste trabalho, um IPMC baseado em Nafion® com Li^+ , H^+ , Na^+ e K^+ como contra-íons, e com eletrodos de platina foi controlado eletromecanicamente, empregando um sistema PI de malha fechada. As DDP's utilizadas neste estudo foram ajustadas no sistema de controle em 1, 1,5 e 2

volts. O objetivo é usar o controlador e verificar a sua capacidade de controlar um atuador IPMC em diferentes condições de UR, DDP's e contra-íons, enfatizando o comportamento do material que compõe o IPMC sob deflexão.

Uma câmera de alta resolução e um algoritmo de visão de máquina foram usados para rastrear o deslocamento da ponta e fornecer uma retroalimentação ao sistema de controle de malha fechada.

Os sistemas de visão implicam em baixo custo, precisão aceitável, alta robustez, alta confiabilidade e alta estabilidade mecânica e de temperatura. Contam com sensores digitais protegidos dentro de câmeras industriais com ótica especializada para adquirir imagens, de modo que o *hardware* e o *software* do computador possam processar, analisar, e medir várias características para a tomada de decisão [23].

Sendo assim, o objetivo geral e inédito deste trabalho foi desenvolver um método de controle por imagem de atuadores IPMC baseados em Nafion®, utilizando técnicas de visão de máquina em ambiente com umidade relativa controlada avaliando o comportamento do atuador IPMC quando o contra-íon incorporado no atuador IPMC fosse alterado.

Os objetivos específicos deste trabalho estão descritos a seguir:

- entender as características morfológicas e elétricas do IPMC, via caracterização;
- construir um sistema elétrico para estimular o atuador IPMC;
- desenvolver o um sistema físico e lógico de controle de umidade relativa;
- desenvolver um sistema de controle utilizando análise de imagens do deslocamento da ponta do IPMC;
- avaliar preliminarmente o controle de trajetória do IPMC, utilizando apenas um contra-íon variando a umidade relativa;
- avaliar o sistema desenvolvido em ensaios de estabilidade e performance, variando o contra-íon e a umidade relativa; e
- correlacionar os parâmetros de controle para com as propriedades do IPMC.

Os experimentos deste trabalho foram realizados utilizando um IPMC incorporado com diferentes contra-íons, H^+ , Li^+ , Na^+ e K^+ . A opção pelo hidrogênio foi de comparar o seu diferente mecanismo de difusão através da membrana polimérica (Grotthus e veicular) para com aos demais contra-íons (somente veicular) no sistema de controle desenvolvido. O planejamento e desenvolvimento dos experimentos foram divididos em três grandes grupos, i) controle de trajetória do IPMC (somente para o Li^+); ii) análise de estabilidade do controle PI; iii) análise de performance do controlador PI com finalidade de avaliar o sistema de controle desenvolvido. Cada um dos grupos de ensaios teve o objetivo específico de avaliar o desempenho do controlador frente às mudanças paramétricas, que além das DDPs constantes (1, 1,5 e 2 volts), foram UR (90%, 60% e 30%), contra-íons.

O controle de trajetória do IPMC foi realizado preliminarmente, e, portanto, realizada apenas com um contra-íon. A escolha pelo Li^+ foi balisada em resultados obtidos anteriormente pelo grupo de pesquisa [3] [24] que apontaram o contra o Li^+ como sendo o contra-íon da família dos metais alcalinos com melhor performance eletromecânica.

A análise de estabilidade foi realizada avaliando os seguintes parâmetros do sistema de controle: i) o tempo de subida (traduzido do inglês, *rise time*), sendo tempo necessário para o atuador IPMC ir de 10% a 90% do estado estacionário; ii) erro de estado estacionário, aproximadamente 5% da trajetória desejada. iii) tempo de estabilização (traduzido do inglês, *settling time*), tempo necessário para a trajetória estabilizar em variações menores ou iguais ao erro do estado estacionário; iv) tempo morto, (traduzido do inglês, *dead time*) espaço de tempo entre a aplicação do estímulo elétrico e a resposta do IPMC e; v) percentual de *overshoot*, pico de sinal que ultrapassa a trajetória desejada. Com esse ensaio de estabilidade, foi possível compreender o comportamento elétrico do atuador IPMC.

A análise de performance foi posteriormente realizada como forma de avaliar o desempenho do controlador PI desenvolvido ao longo do tempo. Esse ensaio consistia em avaliar o desempenho do controlador frente às mudanças cíclicas de trajetória ao longo do tempo. Para isso, foi desenvolvido em Labview,

uma máquina de estados (com dois estados) no sistema de controle, com trajetória positiva (direita) e negativa (esquerda). Uma máquina de estados é a representação de uma máquina abstrata que deve estar em um de um número finito de estados [25]. Com um ensaio de performance, foi possível identificar e compreender o comportamento elétrico do atuador IPMC-Li no tempo frente às mudanças de trajetórias do IPMC.

Com os resultados dos ensaios foi possível explicar o comportamento complexo do IPMC relacionando as propriedades elétricas durante o ensaio com fenômenos de natureza eletroquímica ocorrendo no interior do IPMC ao ser controlador pelo sistema de controle desenvolvido neste trabalho. E assim, foi comprovado que é possível controlar o atuador IPMC utilizando este sistema, além de ser possível correlacionar parâmetros do sistema de controle para com as propriedades dos materiais. Ademais, o mesmo representou uma grande contribuição para o avanço no estado da arte na área IPMC.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Polímeros Eletroativos

Os polímeros eletroativos (do inglês *ElectroActive Polymers* - EAPs) são materiais que têm a capacidade de modificar a sua forma e/ou a sua dimensão em resposta a estímulos elétricos [26], [27]. Um EAP típico possui baixa densidade e estrutura flexível permitindo a integração de atuadores leves e “macios” (termo traduzido do inglês para “*soft actuators*”). Alguns tipos de EAPs realizam movimentos com grandes amplitudes, mesmo em pequena escala, viabilizando aplicações que exijam a miniaturização de atuadores [28].

Existem diversos tipos de EAPs, mas a maioria deles se enquadra em categorias: iônicos (envolvendo mobilidade ou difusão de íons e suas substâncias conjugadas) ou eletrônicos (que são dirigidas por forças de campo elétrico ou *Coulomb*). Os dois tipos são classificados basicamente de acordo com o mecanismo de ativação da matriz polimérica.

EAPs Eletrônicos (eEAPs), possuem elevada constante dielétrica e baixo módulo de *Young*. Ao aplicar uma DDP sobre os eletrodos, os mesmos comprimem a matriz polimérica e a expandem perpendicularmente em relação a elas mesmas, resultando em um achatamento e expansão lateral da matriz polimérica. Sua DDP de ativação é considerada alta, alguns quilovolts (kV), para resultar em deformações significativas.

EAPs Iônicos (iEAPs) são baseados em polímeros ionoméricos ou géis iônicos [29]. Seu mecanismo de deformação é baseado na movimentação dos íons e de moléculas de solvente contidos na matriz polimérica. Quando uma DDP é aplicada sobre os eletrodos, os íons juntamente com as moléculas de solvente migram em resposta ao campo elétrico aplicado na matriz polimérica. Esse polímero foi a base deste estudo.

2.2 Compósitos de Polímero Ionomérico e Metal (IPMCs)

Os Compósitos de polímero ionomérico e metal (IPMCs) consistem em uma fina membrana ionomérica, que funciona como um iEAP, com eletrodos de

metal nobre em ambas as superfícies. Os iEAPs contêm contra-íons para equilibrar a carga dos ânions fixos na matriz polimérica e seu mecanismo de atuação é o da migração de íons, que podem ou não estar solvatados em água, pela aplicação de uma DDP entre as faces de um filme do polímero. Esta migração promove um gradiente de pressão que provoca o dobramento do filme [29], conforme representação esquemática na Figura 2.1.

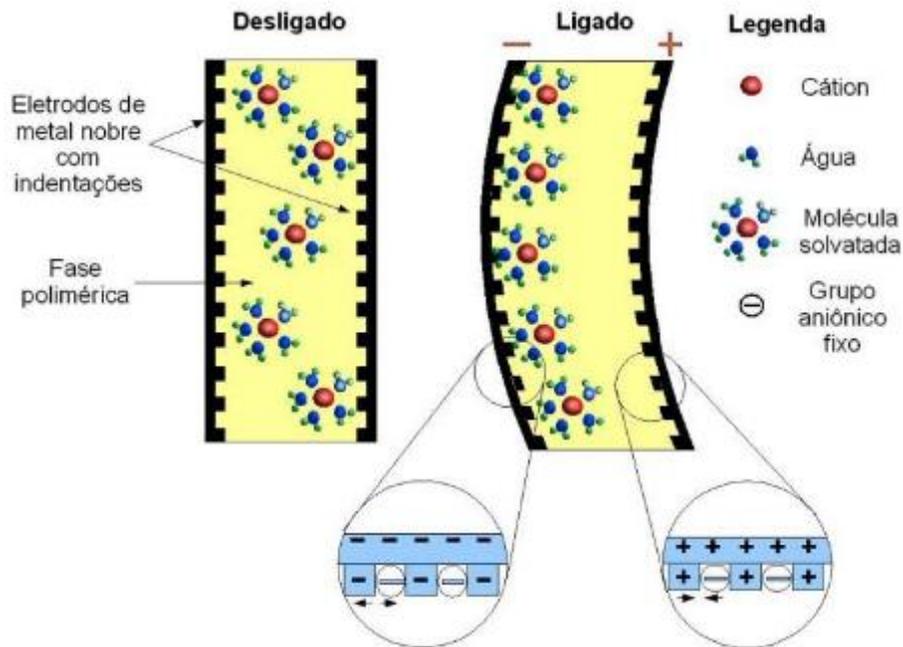


Figura 2.1 - Mecanismo de atuação do IPMC [29].

Os polímeros iônicos típicos mais utilizados são Nafion® (perfluorossulfonato, fabricado pela DuPont) e Flemion® (perfluorocarboxilato, fabricado pela Asahi Glass, Japão) [30].

A variação da UR em que o IPMC está inserido influencia diretamente no seu nível de hidratação e conseqüentemente na sua resposta mecânica. Assim, em ambiente seco, o IPMC perde água, ao passo que, em um ambiente úmido, o IPMC tende a absorver água, graças às suas características anfífilas. Internamente, os grupos de ânions fixados no final das cadeias laterais se agregam para formar regiões compactadas, conhecidas como aglomerados [31] ou clusters [32] e, assim, com o aumento da nível de hidratação, mais moléculas de água estarão presentes, maiores serão os canais ionoméricos e mais facilmente os contra-íons solvatados migrarão. Além disso, a variação de UR

influencia a forma de controle desse dispositivo, ou seja, em ambientes mais secos, o sistema de controle deve ser capaz de fornecer uma quantidade de tensão maior do que em ambientes úmidos para manter a posição desejada. Tendo em vista que a mobilidade iônica é o princípio do funcionamento desses dispositivos, ambientes úmidos acabam sendo mais favoráveis do que os ambientes secos.

Esse é o princípio de funcionamento dos IPMCs, a migração/difusão no interior dos canais em resposta a um estímulo elétrico entre os eletrodos metálicos [31]. Com isso, gera-se um gradiente de pressão no interior do polímero, fazendo com que o dispositivo flexione. Conforme já mencionado, este comportamento eletromecânico está diretamente relacionado ao grau de hidratação do dispositivo [33], [34], tipo de contra-íon utilizado e de sua capacidade de migrar pelos canais ionoméricos [35].

IPMCs são atuadores que mostram deformações significativas na presença de baixa DDP aplicada e exibem baixa impedância apresentando melhor operação em ambientes úmidos [36].

Devido à sua disponibilidade comercial, elevada condutividade iônica e estabilidade química, térmica e estrutural, o Nafion® é o polímero eletroativo mais comumente utilizado para a preparação de IPMCs [37]. Conforme ilustrado na Figura 2.2.a, este polímero possui estrutura química altamente hidrofílica, ou seja, suscetível à absorção de água conferindo assim, elevada condutividade iônica ao material [38]. Contudo, a migração iônica no interior do polímero depende do grau de hidratação e da interação entre a fase hidrofílica e os contra-íons que irão se mover pelos canais ionoméricos [39], conforme ilustrado na Figura 2.2.b. Isto é, o raio iônico e as características químicas do contra-íon irão influenciar a condutividade iônica da membrana e, conseqüentemente, o desempenho do atuador IPMC [1].

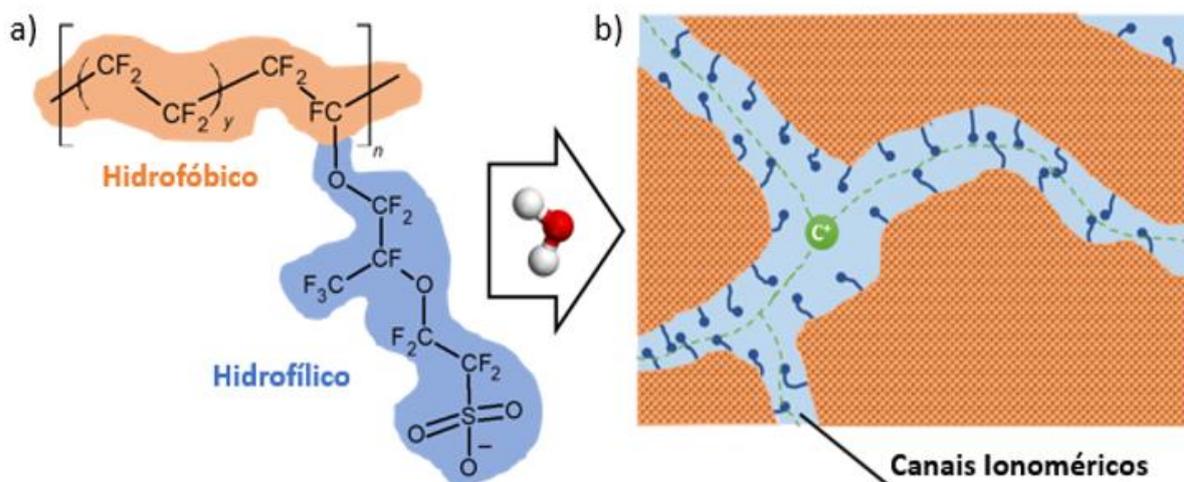
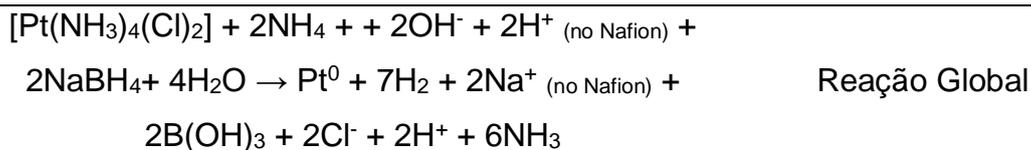


Figura 2.2 - a) Estrutura química do Nafion® 117. b) representação morfológica da matriz polimérica hidratada (C⁺ = contra-íon) [24].

Em relação aos eletrodos metálicos, sua deposição é com base na permeabilidade catiônica da membrana Nafion®. O processo de obtenção do IPMC foi citado pela primeira vez por Oguro [40], que possui dois estágios principais. Na primeira etapa, a membrana de Nafion® é colocada em uma solução aquosa contendo o íon de interesse e deixada em repouso por tempo suficiente para atingir o equilíbrio osmótico. Na segunda etapa, a membrana preenchida com íons é colocada em um agente redutor aquecido. As reações envolvidas nesse processo estão detalhadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Reações envolvidas na deposição primária pelo método de Oguro

Reação	Descrição
$[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4(\text{Cl})_2] + 2\text{NH}_4^+ + 2\text{OH}^- + 2\text{H}^+_{(\text{no Nafion})} \rightarrow$ $[\text{Pt}(\text{NH}_3)_6]^{+2}_{(\text{no Nafion})} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cl}^- + 2\text{H}^+$	Hidrólise
$[\text{Pt}(\text{NH}_3)_6]^{+2}_{(\text{no Nafion})} \rightarrow \text{Pt}^{2+}_{(\text{no Nafion})} + 6\text{NH}_3$	Ativação do complexo
$\text{Pt}^{+2}_{(\text{no Nafion})} + 2\text{NaBH}_4 \rightarrow \text{Pt}^0 + \text{H}_2 + \text{B}_2\text{H}_6 + 2\text{Na}^+_{(\text{no Nafion})}$	Reação redox
$\text{B}_2\text{H}_6 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{B}(\text{OH})_3 + 6\text{H}_2$	Desproporcionamento



Os íons dentro da membrana tenderão a migrar para fora e, ao encontrar o agente redutor, são reduzidos na superfície da membrana até a formação de um filme metálico contínuo. Devido às características de deposição dentro dos canais ionoméricos mais externos, ocorre a formação de eletrodos dendríticos, conforme ilustrado na Figura 2.3 [24]. Em geral, para que um metal seja utilizado como eletrodo no IPMC, ele deve ser química e eletroquimicamente estável nos mais diversos ambientes operacionais [41].

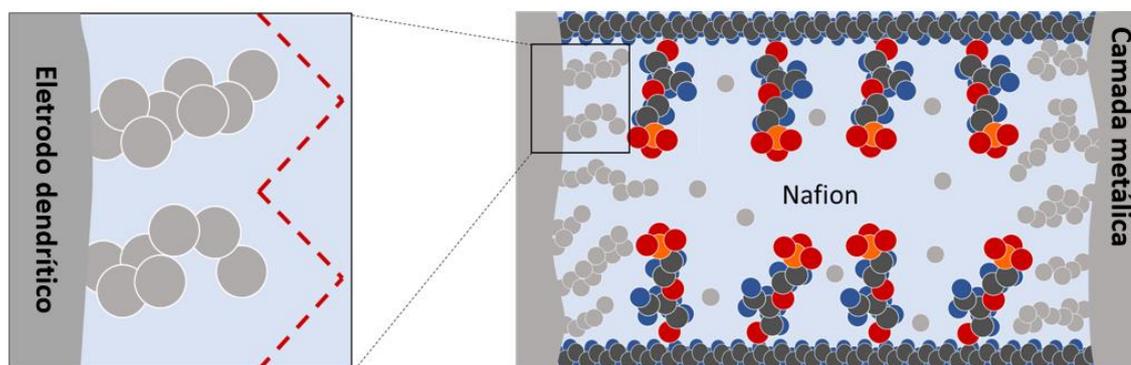


Figura 2.3 - Formação de eletrodos dendríticos [24].

Além disso, devido aos sucessivos movimentos de deformação que o dispositivo irá sofrer, também é interessante que o filme metálico possua boas propriedades mecânicas como alta tenacidade e resistência à fadiga [42]. Diante disso, o maior problema com a maioria dos metais é sua resistência à corrosão galvanostática [43]. Uma vez que a maioria dos metais são instáveis em ácidos oxidativos comuns ao IPMC, poucos materiais podem ser usados. Assim, considerando o aspecto de que para oxidar os metais nobres Paládio (Pd), Platina (Pt) e Ouro (Au) necessitam de um alto potencial elétrico, tornam-se as melhores escolhas para utilização em IPMCs [44].

Além disso, é fundamental compreender por completo o papel da membrana polimérica no desempenho mecânico do IPMC para que com isso o

sistema de controle desenvolvimento seja eficaz. A seguir, será abordada a morfologia do Nafion® detalhando a influência da UR e do contra-íon no comportamento dele.

2.3 Morfologia do Nafion®

A estrutura química do Nafion® é constituída por uma cadeia principal semelhante ao poli(tetrafluoretileno), PTFE, com grupos sulfonados enxertados lateralmente à cadeia. Trata-se de um ionômero, onde o contra-íon, pode ser H⁺, Na⁺ ou outro [45].

Os grupos laterais do Nafion® são éteres perfluorados terminados com um grupo ácido sulfônico (-SO₃X⁺), onde X⁺ é uma espécie catiônica, podendo ser facilmente substituída por outras espécies dependendo do tratamento inicial da membrana. Com esta composição, o material apresenta domínios hidrofóbicos que são oriundos da natureza apolar da cadeia principal e domínios hidrofílicos polares devido a composição dos grupos laterais [45]. A Figura 2.4 ilustra a formulação estrutural do Nafion®.

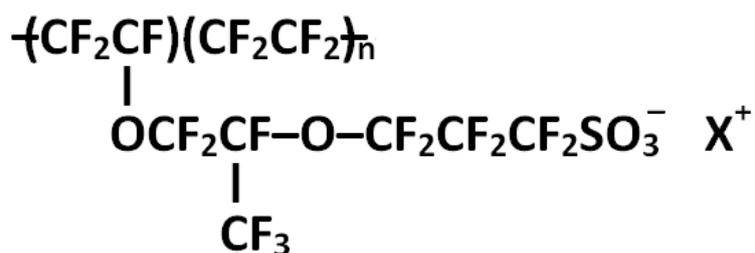


Figura 2.4 - Fórmula estrutural do Nafion®

A cadeia principal de PTFE, responsável pela fase hidrofóbica do Nafion®, se organiza na forma de uma matriz amorfa com pequenos domínios cristalinos. O grau de cristalinidade e a morfologia destes cristalitos estão fortemente relacionados com a estabilidade mecânica, térmica e química do Nafion®. Seu peso equivalente (1100 g mol⁻¹) é determinado pelo número de gramas do Nafion® seco por mol de grupos de ácido sulfônico na forma H⁺, que

significa a representação da distribuição média deste grupo na cadeia polimérica [46].

A hidrofiliçidade da fase ionomérica faz com que a água ali presente possa ficar complexada com o contra-íon [20]. A quantidade de água que ficará confinada na fase hidrofílica do Nafion® dependerá das condições atmosféricas, especialmente da UR. Como uma maior quantidade de água provoca um maior inchamento dos canais ionoméricos, sendo que muitas moléculas de H₂O serão arrastadas com o contra-íon durante sua movimentação, o desempenho do IPMC atuando como músculo artificial, atuador ou sensor terá alta dependência dessa umidade [29].

Quando o Nafion® é hidratado, uma forte interação entre os grupos –SO₃⁻ e as moléculas de água acontecem devido à natureza polar do grupo -SO₃⁻. Como as cadeias laterais são flexíveis, os grupos -SO₃⁻ se aglomeram em torno das moléculas de água formando estruturas complexas. Esses aglomerados por sua vez formam sítios iônicos e hidrofílicos favoráveis para o transporte de cátions e moléculas polares [47]. Em ensaios de espalhamento de Raios-X em baixo ângulo, SAXS, o Nafion® apresenta dois picos de intensidade, o primeiro referente aos domínios hidrofóbicos e o segundo aos domínios hidrofílicos.

Muitos modelos foram propostos para entender morfologia do Nafion® e assim compreender melhor o seu comportamento. O modelo de rede de aglomerados iônicos de Gierke [48] desenvolvido em meados dos anos 1980 foi o precursor a estudar as propriedades dessas membranas poliméricas principalmente no que diz respeito a permeabilidade iônica, além de descrever o transporte de íons e água. Esse modelo assume que existam aglomerados cilíndricos de aproximadamente 40 Å ao longo da matriz de PTFE com suas terminações nos grupos sulfônicos (SO₃⁻). Os mesmos são organizados na forma de micelas invertidas e dispostos em uma rede. Essas micelas são conectadas por canais cilíndricos de aproximadamente 10 Å e assim foi possível explicar a passagem das espécies carregadas positivamente entre os aglomerados [49]. A Figura 2.5 representa o modelo de Gierke.

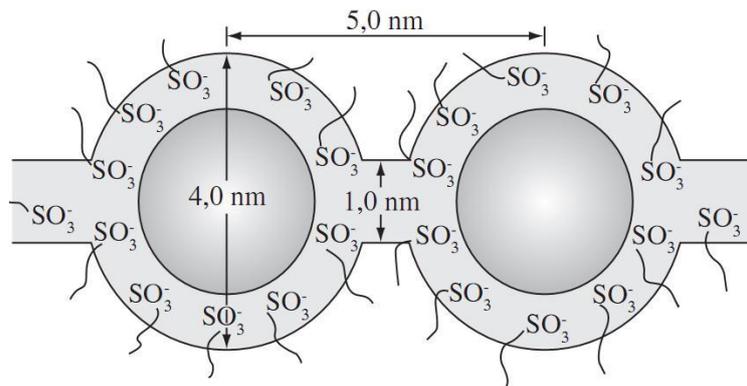


Figura 2.5 - Representação do modelo de Gierke [32].

Anos mais tarde Yeager e Steck [50], propuseram um modelo trifásico sobre a difusão dos íons na membrana polimérica que difere do modelo proposto por Gierke. Entederam que os aglomerados não possuem uma geometria esférica perfeita e sim uma distribuição geométrica indefinida conforme apresentado na Figura 2.6.

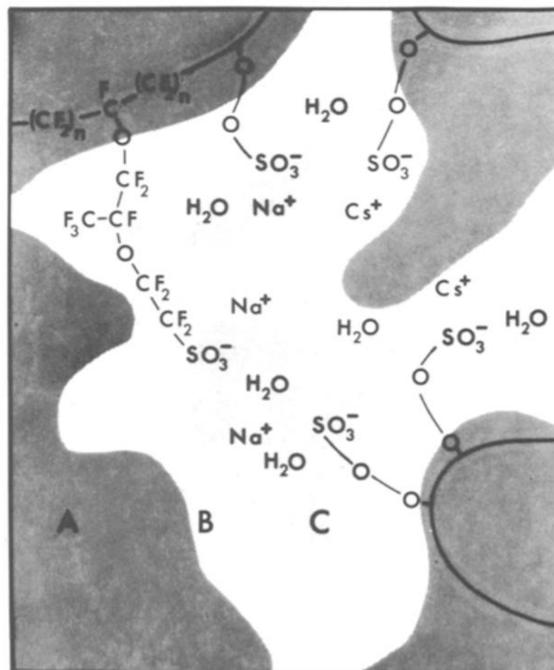


Figura 2.6 - Modelo estrutural trifásico do Nafion®: **A)** CF_2 ; **B)** zona interfacial; **C)** aglomerados [50]

Na Figura 2.6 três regiões são indicadas: A região **A** consiste na fase de CF_2 , os aglomerados iônicos formam a região **C** e **B** é uma região interfacial entre **A** e **C**. A região **A** conteria material de base de CF_2 . A região **C** incorporaria locais de troca de sulfonatos, a maior parte da água sorvida e alguns contra-íons. A região **B** é vista como um volume de vazios fracionário relativamente grande, contendo material de cadeia lateral pendente, uma quantidade menor de água absorvida, alguns locais de troca de sulfonato que não foram incorporados aos aglomerados e uma fração dos contra-íons. As proporções relativas dos contra-íons nas regiões **B** e **C** dependeriam do tamanho, densidade de carga e energia de hidratação do contra-íon. Íons de baixa densidade de carga ou grande tamanho, como césio (Cs^+), prefeririam a região **B**, enquanto íons de maior densidade de carga e energia de hidratação se localizariam nos aglomerados iônicos mais aquosos [50].

Posteriormente, outros modelos foram propostos, mas, todos convergiam na tese de que os grupos iônicos se agregam na matriz polimérica para formar uma rede de aglomerados que permitem um inchamento significativo por solventes polares e um eficiente transporte iônico. Porém, divergiam quanto à geometria e distribuição dos aglomerados iônicos que eram diretamente vinculados à hidratação da membrana polimérica.

Mais tarde, em 2011, Elliot e colaboradores [51] propuseram o modelo mais recente. Esse modelo considera informações estruturais de padrões SAXS baseados em uma abordagem de máxima entropia aliada a simulações em mesoescala da morfologia usando Dinâmica de Partículas com Dissipação (do inglês *Dissipative Particle Dynamics - DPD*) parametrizada com cálculos atomísticos e teoria da densidade funcional (do inglês *Density Functional Theory - DFT*). Esses dois métodos mostram que o agrupamento iônico em nanoescala está intimamente ligado, mas espacialmente separado, da organização em escala maior da estrutura de CF_2 .

A Figura 2.7 ilustra uma representação do modelo morfológico do Nafion® hidratado proposto por Elliot e seus colaboradores.

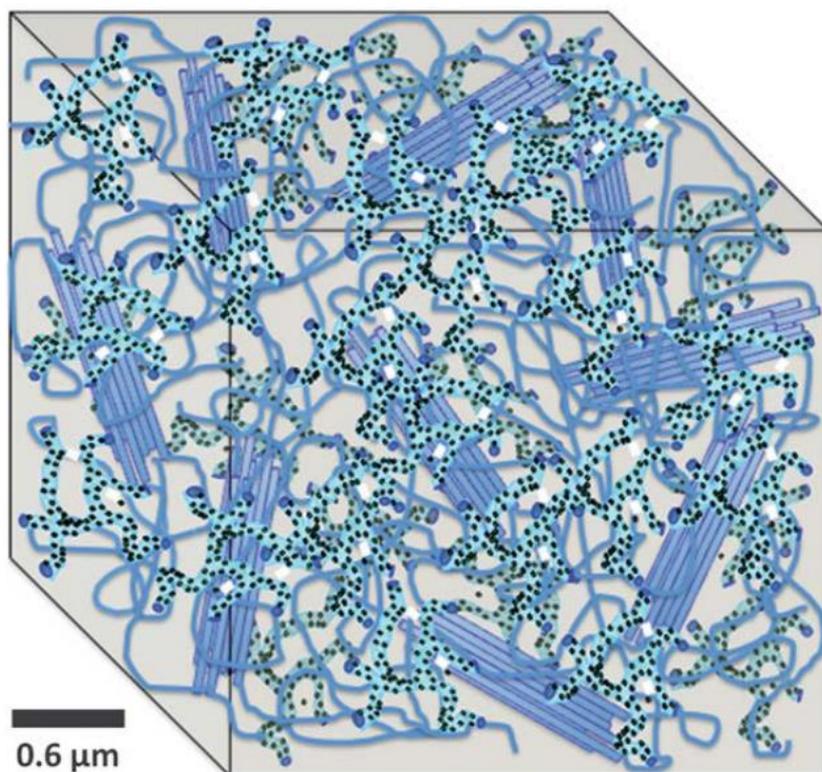


Figura 2.7 - Morfologia do Nafion® hidratado [51].

A representação ilustra a rede contínua 3D (canais azuis claros) de aglomerados iônicos (pontos pretos) rodeados por regiões amorfas e cristalinas de cadeias de CF_2 (azul escuro). A barra de escala foi calibrada a partir da distância entre os aglomerados iônicos (pontos pretos) obtidos no SAXS.

Por fim, os autores demonstraram que a morfologia mais plausível consiste em redes contínuas independentes de aglomerados iônicos e cadeias de CF_2 . Além disso, indicaram que há uma relação entre a morfologia e a propriedades de transporte para explicar o alto coeficiente de difusão da água no Nafion® sem a necessidade de canais paralelos, que é, a existência de uma rede contínua de canais cheios de água [51]. Como discutido, a UR e o contra-íon desempenham papéis fundamentais no desempenho mecânico do atuador IPMC, sendo assim, a próxima seção detalha a influência da UR e do contra-íons no comportamento do IPMC.

2.3.1 Influência da UR e do contra-íon no comportamento do IPMC

Um IPMC tem a funcionalidade de um transdutor, isto é, transforma um tipo de energia em outra. Sendo assim, na utilização de um IPMC como atuador mecânico, é necessário estimulá-lo eletricamente. Conforme mencionando anteriormente, esse estímulo provoca uma deformação, resultado de um gradiente de pressão interna proveniente da migração iônica através da membrana polimérica. Essa migração ocorre sempre no sentido do ânodo, que é o polo negativamente carregado do eletrodo atraindo os contra-íons em sua direção, conforme apresentando anteriormente na Figura 2.1.

Entretanto, dois fatores principais influenciam na forma de migração iônica no interior do polímero, que são, o solvente, no caso a água absorvida e o contra-íon utilizado para neutralizar o grupo sulfônico [52]. Os contra-íons mais comumente estudados são, H^+ , Li^+ e Na^+ além de outros serem eventualmente utilizados como, K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Ba^{++} . Atuadores que utilizam o contra-íon Li^+ , por exemplo, produzem melhores resultados eletromecânicos, devido dentre outros fatores, o pequeno raio iônico (0,069 Å) e conseqüentemente uma excelente mobilidade no interior do polímero [53].

A grande quantidade de água absorvida pela matriz polimérica facilita a migração iônica, já que satura os canais ionoméricos e aumenta significativamente os aglomerados iônicos criando um ambiente favorável para o movimento do IPMC. Com isso em mente, que os primeiros IEAPs foram projetados para operar exclusivamente em ambientes aquáticos [54]. No entanto, em aplicações reais de trabalhos nem sempre isso será o ideal, por isso, a vida útil desses atuadores é bastante curta em ambiente seco, principalmente por causa da alta taxa de evaporação do solvente [55].

Além desses dois cenários, outros estudos [24], [56], [57] avaliaram o comportamento do IPMC em ambiente com UR controlada a fim de encontrar as condições ideais de trabalho com a menor perda de desempenho. No estudo de Zhu et al. [58], onde foi investigada a influência da UR na resposta da tensão sob uma deformação de flexão em um IPMC sensor, foram realizados ensaios em UR controlada (em água, 90%, 70%, 50%, 30%, 20%, seca). Os resultados

indicaram que a UR influencia a resposta da tensão principalmente pela variação do conteúdo de água no polímero iônico, isto é, a amplitude da tensão diminui conforme o conteúdo de água diminui. A relação é controlada principalmente pelo efeito de queda de tensão e a velocidade de resposta.

Brunetto et al. [59] avaliaram a influência da UR e da temperatura (porque as características do polímero são frequentemente influenciadas por essa grandeza) na resposta de transdutores IPMC para a área da biomedicina. E assim, evidenciaram que, de fato, a UR altera o comportamento dos transdutores IPMC, tanto para sensores quanto como atuadores, pois altera o módulo de *Young* e, conseqüentemente, sua resposta mecânica. Em contrapartida, nenhuma dependência significativa da temperatura foi constatada.

Por outro lado, a grande dependência da hidratação do polímero é um grande desafio a ser solucionado, pois para tensões acima de 1,23 V ocorre a perda de água através eletrólise além da perda natural que já ocorre, causando uma redução na mobilidade dos contra-íons metálicos e danos ao eletrodo metálico [60]. Por este motivo, muitos estudos têm sido realizados para substituir a água, o solvente interno convencional no IPMC, por compostos orgânicos mais estáveis e menos voláteis. No entanto, o uso de solventes orgânicos sozinhos resulta em um desempenho de atuação limitado e lento. A mistura de solventes orgânicos e água poderiam melhorar a estabilidade eletrolítica [61].

2.3.2 Mecanismos de transporte do contra-íon

Para a condução dos contra-íons, nesse tipo de membrana, esses, devem se dissociar dos grupos iônicos da membrana, solvatar esses mesmos grupos iônicos e fornecer uma estrutura de rede para transportarem os contra-íons através da membrana. A dissociação, solvatação e estrutura de rede são afetadas pelas várias interações no sistema. Com relação às interações da água, a mesma combina-se com contra-íons e solvata os grupos SO_3^- . A água, é claro, interage com outras moléculas de água e é inicialmente repelida do material hidrofóbico da estrutura principal [62].

Partindo desse princípio, os mecanismos de transporte do contra-íon através da membrana do Nafion® podem ser divididos em quatro tipos: Grotthuss, Transporte veicular, Difusão e Arrasto eletro-osmótico.

- Grotthuss, refere-se a alta mobilidade do próton (H^+) na água em relação a outros contra-íons simples (Li^+ , Na^+ , K^+ , etc) [63] criando um mecanismo de transporte distinto da difusão iônica típica, devido simplesmente ao movimento aleatório das moléculas, ou seja, movimento browniano. Essa alta mobilidade é geralmente atribuída a um mecanismo de transporte de salto ou Grotthuss. O mecanismo de Grotthuss, em seu contexto original, é o mecanismo que descreve a difusão de um "excesso" de próton através de uma rede de ligações de hidrogênio de moléculas de água (ou outros líquidos ligados por hidrogênio) por meio de ligações covalentes. No mecanismo de Grotthuss, então, um átomo de oxigênio recebe um átomo de hidrogênio (adicional) e simultaneamente passa um átomo de hidrogênio para um átomo de oxigênio adjacente [64].
- Transporte veicular, o próton depende do movimento de uma molécula de água, por exemplo, a difusão da água. Portanto, a taxa de transporte veicular está diretamente correlacionada com a taxa de transporte da água. Por outro lado, se o transporte de água é restrito, o mesmo ocorre com o transporte de prótons pelo mecanismo veicular [65].
- Difusão, é o movimento de translação aleatório de moléculas em solução como consequência de sua energia térmica, também conhecido como movimento molecular browniano e simplesmente chamado de difusão ou autodifusão. Este movimento é amplamente dependente dos parâmetros físicos de tamanho, forma, temperatura e viscosidade. A probabilidade condicional de encontrar uma molécula é uma distribuição gaussiana que se amplia com o aumento do tempo de difusão [65].
- Arrasto eletro-osmótico: refere-se ao transporte de água do ânodo para o cátodo em virtude de uma corrente protônica. O coeficiente de arrasto eletro-osmótico é o número de moléculas de água arrastadas por próton. Em geral, deseja-se maximizar a condução de prótons em todos os conteúdos de água e minimizar o arrasto eletro-osmótico, já que o arrasto

de água através da membrana tem o efeito indesejado de secar a membrana após o arrasto [66].

Os fatores que influenciam diretamente o comportamento do IPMC aqui mencionados são de suma importância para entender o funcionamento dele na função de atuador/sensor e correlacioná-lo com fenômenos que ocorrem no interior do material. Por isso, controlar e modelar o comportamento do IPMC tem sido um desafio. No próximo tópico serão detalhados os temas, sistemas de controle, tipos de malhas e algoritmos comumente utilizados.

2.4 Sistemas de Controle

Um sistema de controle pode ser definido como um conjunto de equipamentos e dispositivos que gerenciam o comportamento de máquinas ou outros sistemas físicos. Para isso, é necessário realizar a modelagem matemática do processo, seguida do projeto do controlador, posteriormente, segue-se para a elaboração física dos sistemas. Alguns processos podem ser não controláveis ou apresentar não-linearidades de operação. Nestes casos, devem ser utilizadas técnicas de controle sofisticadas, conforme os objetivos de projeto e custos envolvidos [67].

Há basicamente dois tipos mais comuns de controladores com diversas variações e combinações, **i)** microcontrolador ou controle lógico, muito utilizado na indústria em sensores, termostatos, pressostatos em forma de controlador lógico programável (CLP); **ii)** controle realimentado, podendo ser ele de malha aberta ou fechada [67].

Abaixo são descritos os tipos de controladores realimentados sendo que um deles foi utilizado no presente estudo.

2.4.1 Sistemas de Controle em Malha Aberta

A principal característica do sistema em malha aberta é a inexistência de realimentação; os valores assumidos pela variável de controle não dependem dos valores da variável de saída. A ação de controle é em função apenas do

processamento da variável de referência pelo controlador [68]. Uma representação de um sistema de malha aberta é ilustrada na Figura 2.8.

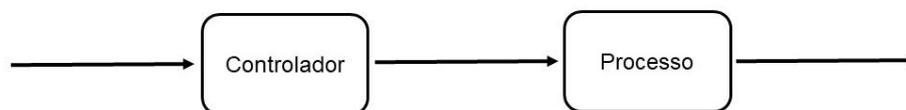


Figura 2.8 -Sistema de controle em Malha Aberta [68].

Ao observar a Figura 2.8 identifica-se que o processo a ser controlado recebe uma ação de controle e logo após o mesmo responde a essa ação modificando a variável de processo.

2.4.2 Sistemas de Controle em Malha Fechada

Sistema de controle de malha fechada na sua forma mais usual é constituído por componentes contínuos ou analógicos, onde o sinal de saída é determinante na ação do controle, pelo qual pode ser chamado de controle retroalimentado. Assim, o sinal de erro que corresponde à diferença entre o valor da referência e de realimentação é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor previamente determinado pelo usuário.

Em suma, o sistema em malha fechada implica na existência de uma realimentação com o intuito de reduzir o erro e manter a saída de um sistema num valor desejado [68]. A Figura 2.9, representa um sistema de controle em malha fechada.

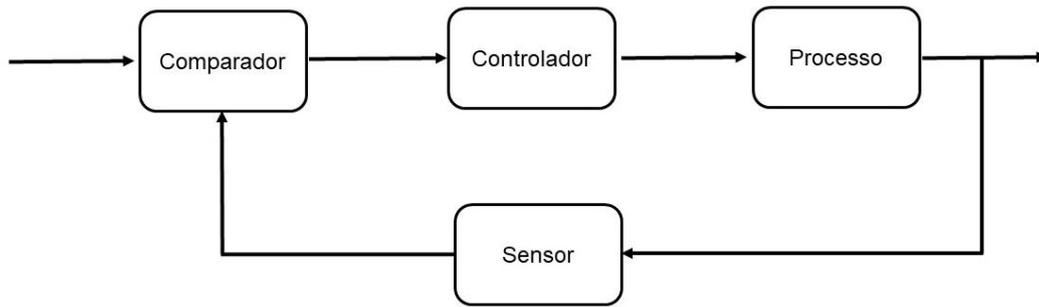


Figura 2.9 -Sistema de controle em Malha Fechada [68].

A Figura 2.9 ilustra dois componentes a mais que o sistema em malha aberta, o comparador e o sensor. Ambos exercem papéis fundamentais na tarefa de controle do processo.

2.5 Controle do IPMC

Para que se possa utilizar o IPMC como atuador mecânico nas mais diversas áreas em potencial, é preciso controlar sua trajetória de maneira satisfatória. Nesse sentido, diversos métodos de controle foram estudados e implementados na literatura. Métodos de controle baseados em inversão [69]–[71], em controle ótimo [72]–[74], adaptativo [75]–[79], repetitivo [80]–[89] de modo deslizante [90]–[95], além de outros métodos [17], [96]–[102].

Contudo, nessa seção será enfatizado o método de controle PID, assim como seus prós e contras, já que foram utilizadas como base teórica para o desenvolvimento do presente estudo. As variações no contexto do estado da amostra de IPMC, do sensoriamento, além da abordagem utilizando método de visão de máquina também o serão.

2.5.1 Controlador PID

A simplicidade é uma das principais vantagens de um controlador PID. Na prática, os controladores PID são utilizados em grande escala pela indústria por proporcionar controle satisfatório em diversos sistemas de controle e por sua facilidade de compreensão e otimização. A maioria dos controladores PID é

ajustada em campo, utilizando diferentes técnicas de ajuste, porém, como a maioria dos processos físicos é de natureza não linear, em muitas situações as regras de sintonia clássicas podem não proporcionar um controle eficaz do processo [68].

Como o nome sugere, o algoritmo PID é composto por três coeficientes: proporcional, integral e derivativo, que somados, buscam obter a resposta ideal para o sistema.

Resposta Proporcional: A componente proporcional depende apenas da diferença entre o valor de referência e o sensor da medida. Esta diferença é referida como o termo de erro. O ganho proporcional determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Por exemplo, se o termo de erro tem uma magnitude de 10, um ganho proporcional de 5 produziria uma resposta proporcional de 50. Em geral, aumentando o ganho proporcional irá aumentar a velocidade da resposta do sistema de controle.

Resposta Integral: A componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente. A resposta integral irá aumentando ao longo do tempo a menos que o erro seja zero, portanto, o efeito é o de conduzir o erro de estado estacionário para zero. O Estado-estacionário de erro é a diferença final entre o sensor da medida e do valor de referência. Um fenômeno chamado *wind up* (aumento progressivo na descarga do potencial de ação às estimulações repetidas) integral ocorre quando a ação integral satura um controlador, sem que o controlador ajuste o sinal de erro para zero.

Resposta da Derivada: A componente derivada faz com que a saída diminua se o sensor de medida está aumentando rapidamente. A derivada de resposta é proporcional à taxa de variação do sensor de medida. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo fará com que o sistema de controle reaja mais fortemente às mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utilizam o tempo derivativo muito pequeno, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de *feedback* do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a derivada

de resposta pode tornar o sistema de controle instável [103]. Com base nisso, espera-se ser possível a utilização de apenas as componentes proporcional e integral para realizar o controle do atuador IPMC - caracterizando um típico controlador PI - já que o método de ativação desses dispositivos se dá em baixas frequências, isto é, são lentos.

O funcionamento do algoritmo PID (Equação 2.1), definindo, $u(t)$ como o sinal de saída, é apresentado por Graham *et al.* [104] como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^T e(x) dx + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.1)$$

Onde: K_p = Ganho proporcional; K_i = Ganho integral; K_d = Ganho derivativo; e = Erro; t = Tempo, T = Tempo da integral.

A Figura 2.10 abaixo, ilustra uma curva típica de um algoritmo PID de malha fechada

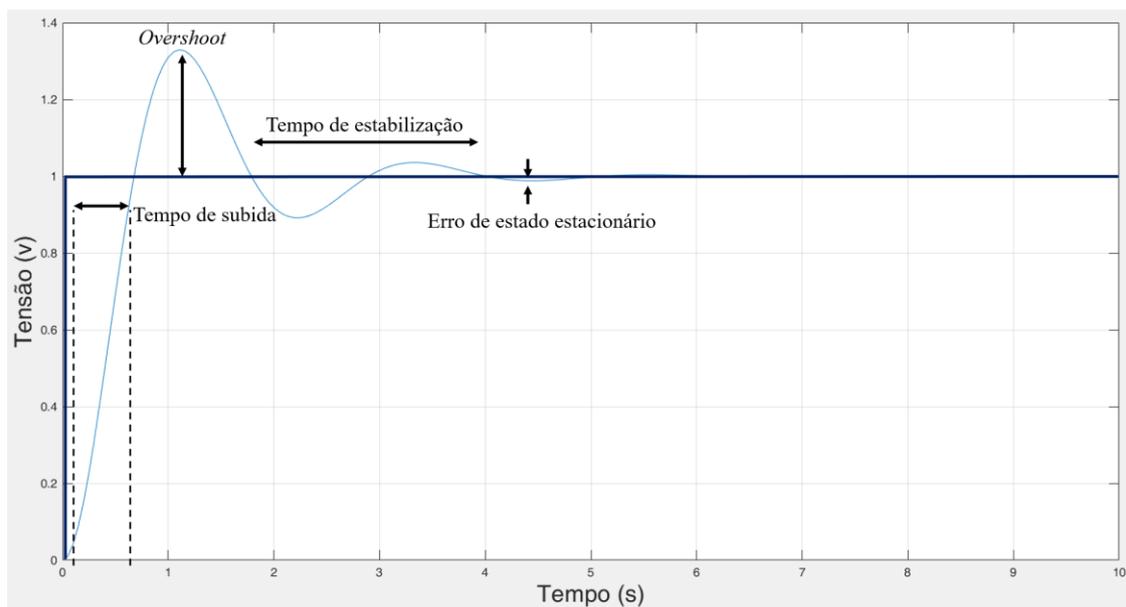


Figura 2.10 - Resposta típica de um sistema PID de malha fechada [104].

Na Figura 2.10, é possível identificar quatro diferentes pontos principais; **i) tempo de subida**, é o tempo necessário para ir de 10% a 90% do estado estacionário, ou valor ajustado; **ii), overshoot**, quantidade excedente de tensão sobre o valor ajustado, **iii) tempo de estabilização**, é o tempo necessário para

que a tensão estabilize no valor ajustado e **iv) erro de estado estacionário**, diminuição do erro proveniente do valor ajustado até a estabilização da tensão. Esses parâmetros são importantes para avaliar um sistema de controle, e os mesmos serão utilizados neste trabalho como forma de avaliar o sistema de controle proposto.

Com relação aos controladores PID utilizados em sistemas de controle de IPMC, diversos trabalhos já implementaram esse tipo de controlador e avaliaram os resultados. Em Khawwaf et al. [19] e Kim e Kim [20], ambos empregaram controladores PID para controlar o deslocamento da ponta dos atuadores IPMC baseado em Nafion® 117 e o sensor de feedback do PID utilizado foi um laser. Em Khawwaf et al. [19] a operação do atuador foi em ambiente subaquático. Os autores projetaram um controlador PID para uma função de transferência identificada simples, que não levava em consideração as não linearidades do IPMC. Os ganhos do controlador PID foram obtidos por tentativa e erro, em relação a determinados objetivos de controle. Os experimentos demonstraram a capacidade do atuador de rastrear sinais quadrados e sinusoidais (cada um com amplitude de 0,05 mm e duas frequências de 0,01 e 0,02 Hz) durante pelo menos 350 segundos e sinal de passo de 0,05 mm durante pelo menos 25 segundos.

Kim e Kim [20] descreveram a resposta do atuador IPMC em um ambiente seco por meio de um modelo probabilístico juntamente com o modelo de histerese de Bouc-Wen (BW). Em seguida, eles usaram um algoritmo de aprendizagem baseado em amostragem com complexidade polinomial para obter valores adequados de ganhos PID, mantendo a repetibilidade e robustez para uma determinada faixa operacional. Resultados de simulação e experimentais mostraram que o esquema de controle proposto é robusto à incerteza dependente da amostra, ao contrário do controlador PID projetado apenas para um modelo nominal. Durante os experimentos, o filme de IPMC manteve com precisão a trajetória desejada (até 4 mm) durante pelo menos 40 segundos e rastreou uma trajetória senoidal (com amplitude de 2 mm) em pelo menos 70 segundos.

Os trabalhos de Liao et al. [21], [105], [106] relatam o controlador PI usado para rastrear a curvatura de um atuador IPMC. Deng e Wang [105] e Wang et al.

[106] utilizaram o controlador PI para controle de rastreamento em sistema não linear com incertezas e restrições de entrada (bem como histerese no trabalho de Deng e Wang [105]). O trabalho de Liao et al. [21] o sistema de controle estável robusto do IPMC de Deng e Wang [105], [106] foi identificado como uma função de transferência equivalente. Então, usando a função de transferência obtida, os autores aplicaram um algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo para encontrar os ganhos ótimos de K_p , K_i do controlador PI.

Outra variação do controlador PI, o chamado controlador proporcional-integral-plus (PIP), foi utilizado para o controle do IPMC no trabalho de Zakeri e Moeinkhah [107]. O controlador sugerido foi combinado com dois termos adicionais: um termo adaptativo para a identificação em tempo real precisa dos parâmetros do sistema e um termo ideal para o ajuste em tempo real dos ganhos do controlador. O termo adaptativo foi implementado por meio do método dos mínimos quadrados recursivo com filtro de Kalman, enquanto o termo ótimo foi representado por um regulador quadrático linear. Este esquema de controle apresentou resultados superiores em comparação com um controlador PID digital e outras técnicas de *loop* aberto aplicadas ao mesmo sistema.

A aplicação de controladores PID em modelos de ordem fracionária de IPMC foi relatada nos trabalhos de Chen e Xue [108] e Tepljakov et al. [109]. Os modelos de ordem fracionária podem descrever com mais precisão as características semelhantes à memória do material IPMC e os métodos de controle de ordem fracionária são mais eficazes do que os convencionais de ordem inteira

Já no trabalho de Fang et al. [110], o controlador PID foi utilizado para rastrear o ângulo de curvatura do atuador IPMC, que foi especialmente projetado e fabricado para um cateter cardíaco ativo descartável. Fu et al. [111] aplicaram o controlador PI (ajustado usando um esquema de iteração experimental) para estabilizar a força de corte de um dispositivo cirúrgico robótico de 1-DOF (grau de liberdade) acionado pelo IPMC. Abaixo, são discutidas as variações que podem ocorrer na etapa de controle dos atuadores IPMC.

2.5.1.1 Variações do atuador IPMC

Em linhas gerais, o comportamento dinâmico de um IPMC é caracterizado por diferentes variações, que complicam o seu controle. Assim, como aponta o estudo de Aabloo et al. [112], é possível dividir as variações em três categorias: **intra-amostra**, **entre-amostras** e **ambientais**.

Variações intra-amostra, são mudanças no comportamento dinâmico de uma única amostra IPMC sob várias ativações com as mesmas entradas de controle e condições externas. Tal fenômeno, também conhecido como envelhecimento de IPMC e não repetibilidade de respostas de IPMC, é causado por complicadas reações eletroquímicas no material de polímero iônico ou efeitos químicos e mecânicos nos eletrodos. Bhat e Kim [96] utilizaram um compensador avanço-atraso de fase, (traduzido do inglês, *lead-lag*) em modo de malha fechada para superar a não repetibilidade das respostas do IPMC.

No trabalho de Xing et al. [99], as características internas de variação no tempo de um IPMC foram incorporadas ao modelo como uma função não linear desconhecida e, em seguida, o controle de rejeição de perturbação ativo foi empregado para compensar as incertezas do modelo não linear. Ambos, Hwan Lee et al. [100] e Kim et al. [113] afirmam que o método de controle de atraso de tempo é robusto contra as características de variação no tempo do IPMC e pode rastrear com precisão o sinal de referência desejado, mesmo após a atuação repetida.

Variações entre amostras, são diferenças nos comportamentos dinâmicos de amostras IPMC diferentes, mas idênticas em tamanho e composição. Mesmo as amostras do mesmo lote podem se comportar de maneira ligeiramente diferente umas das outras. Por este motivo, geralmente, a aplicação de uma nova amostra IPMC requer a alteração dos parâmetros do modelo e do controlador. No entanto, Hao et al. [93] relataram que o método de controle do modo deslizante permite substituir as amostras do IPMC sem qualquer alteração dos parâmetros do controlador;

Variações ambientais, entende-se variações nas condições ambientais como sendo mudanças na dinâmica comportamento de um material IPMC sob

variação de temperatura, umidade relativa, pH [34], [59], [114], [115]. Caponetto et al. [116] desenvolveram um modelo considerando a influência da umidade relativa nos atuadores IPMC. O modelo consiste em submodelos elétricos, químicos, térmicos e mecânicos interagindo por meio de termos de acoplamento. Para tornar o modelo sensível às variações de umidade, vários de seus parâmetros foram otimizados para quatro valores de umidade relativa: 40%, 60%, 80% e 100%.

Nakshatharan et al. [97] relataram o comportamento de um atuador IPMC foi modelado como a rede neural multicamadas gerais ajustada pelo algoritmo de retropropagação de *Levenberg-Marquardt*, de forma que a magnitude da umidade relativa foi incorporada como um dos parâmetros do modelo. Este, juntamente com o controlador preditivo foi verificado experimentalmente em um nível de umidade variando de 10% a 90%. Dong e Tan [71] modelaram o comportamento do IPMC como uma função de transferência, cujos zeros e pólos dependem da temperatura ambiente. Então, usando a medição de temperatura, o modelo é invertido no valor de temperatura atual para ser usado no controle de malha aberta.

Bernat e Kolota [117] incorporaram a dependência da umidade do atuador IPMC no modelo baseado em física de Chen et al. [118]. Além disso, eles aplicaram um observador adaptativo para estimar o teor de umidade desconhecido por meio de uma resistência IPMC variável, de modo que um sensor de umidade não seja necessário. Em seguida, um algoritmo de controle foi desenvolvido para operação contínua de longo prazo no ar. Abaixo, são discutidas as variações no que tange o sensoriamento dos sistemas de controle.

2.5.1.2 Sensoriamento do atuador IPMC

Os sensores mais comuns usados para controle de *feedback* de atuadores IPMC são lasers, câmeras e sensores de força. Sensores a laser são frequentemente empregados para medir o deslocamento da ponta, enquanto as câmeras podem ser utilizadas na estimativa do perfil de curvatura do IPMC. O laser e a câmera não tocam fisicamente o atuador, isto é, não provocam bloqueio

ao movimento. As vantagens dos lasers são o amplo alcance de detecção e alta resolução. Além disso, o feixe de laser pode penetrar em materiais transparentes (água e alguns plásticos), o que o torna uma boa ferramenta para experimentos subaquáticos. No entanto, a superfície reflexiva do material IPMC às vezes pode adulterar a medição da distância entre o laser e o material. Outra desvantagem é que, em geral, os sensores a laser não são adequados para a detecção de grandes deformações de curvatura. Visto que a ponta do IPMC se move ao longo de um caminho circular, podendo sair do feixe de laser sob grandes deformações de curvatura. Ao contrário dos lasers e câmeras, os sensores de força contatam fisicamente os atuadores IPMC [112].

O sensor de força bloqueia o movimento da ponta do IPMC, no entanto, a parte do meio do atuador pode continuar a deformar-se sob tensão de controle, o que pode distorcer as medições da força. A desvantagem comum dos lasers, câmeras e sensores de força tradicionais é que eles são muito volumosos para serem usados em dispositivos minúsculos. Os esforços para superar os problemas dos sensores tradicionais podem ser divididos em três segmentos: **método sem sensor**, de **autodetecção** e de **sensoriamento integrado** [112].

Método sem sensor significa a ausência de quaisquer sensores, medindo a saída do sistema (ou seja, deslocamento da ponta, curvatura ou força). Neste caso, os métodos de controle *feedforward* (antecipação de variações da variável manipulada) ou de estimativa indireta são empregados. Os métodos *feedforward* incluem o controle baseado em inversão, aplicado a atuadores IPMC em Vunder et al., Dong e Tan [69]–[71], [77], [109], [119]. Chen et al. [120] se propuseram a estimar a posição do IPMC por meio de um observador, desenvolvido para o modelo não linear de Chen et al. [118]. Esta abordagem requer o conhecimento da corrente, que pode ser calculada medindo a tensão de um pequeno resistor, conectado ao atuador IPMC em série. Kazem e Khawwaf [121], [122], sugerem modelos de caixa preta baseados em rede neural de IPMC para serem usados como “sensores virtuais”, calculando o deslocamento da ponta. A principal desvantagem do controle sem sensor é a necessidade de um modelo muito preciso, o que é difícil de conseguir para atuadores IPMC.

Método de autodeteção: sugerem o uso das capacidades sensoriais do próprio atuador IPMC, medindo as alterações em seus parâmetros elétricos internos para deduzir a saída real. Duas técnicas de autodeteção mais comuns utilizam a resistência superficial das camadas de metal do IPMC, são relatadas em Punning et al. [123], [124] e a conversão da deformação mecânica em sinais elétricos em Ferrara et al. [125], [126]. Além disso, Ko et al. [127], [128] propõem o uso da carga elétrica do IPMC, que se correlaciona com sua curvatura. A fim de distinguir as cargas do controle, sugere-se medir a carga durante um estado de estado aberto instantâneo por meio de uma chave analógica.

Para Sasaki et al. [119], a carga total do IPMC desidratado foi usada para o controle de *feedback* de autodeteção na UR absoluta extremamente baixa, na qual a relação entre a curvatura de flexão e a carga total torna-se linear. Outra técnica de autodeteção, chamada de sensor de resistência de alta frequência, foi apresentada por Bakhtiarpour et al. [129]. O método permite detectar a flexão do atuador medindo a resistência através do IPMC em uma frequência suficientemente alta, o que faz com que a dependência tensão-corrente mostre um comportamento linear e siga a lei de Ohm. Uma vez que a autodeteção pressupõe o emprego simultâneo do IPMC como um atuador e um sensor, um dos principais problemas é a separação dos sinais de direção e de detecção para evitar problemas indesejados. A fim de superar esta dificuldade, pode-se aplicar camadas de eletrodo padronizadas, de modo que os eletrodos sejam divididos em seções eletricamente isoladas, mas fisicamente conectadas, uma das quais é usada puramente como um sensor e a outra como um atuador.

Sensoriamento integrado, tem como objetivo usar sensores alternativos, adequados para miniaturização e incorporação em um dispositivo. Por exemplo, no trabalho de Fu et al. [111] em vez de medir diretamente a força, um extensômetro simples é usado para medir a deflexão de uma viga engastada, acionada pelo IPMC. Então, a força pode ser calculada a partir da deflexão medida. O medidor de tensão é barato, em pequena escala e, ao contrário dos sensores de força, não bloqueia o deslocamento do IPMC.

Já no trabalho de Leang et al. [88], dois extensômetros, ligados ao eletrodo de superfície do IPMC, são utilizados para monitorar o deslocamento do

atuador. Além disso, Chen et al. [130] desenvolveram sensores integrados de flexão e força baseados em filmes de fluoreto de polivinilideno (PVDF). O sensor de flexão consiste em dois filmes PVDF finos, ligados em direções polares opostas a ambos os lados do atuador IPMC com camadas isolantes entre eles, enquanto o sensor de força representa um feixe de poliéster fino ensanduichado por dois filmes PVDF e fixado no final do atuador IPMC.

Outra abordagem de detecção integrada sugere o uso do sinal de detecção de uma amostra complementar do IPMC, acoplado ao atuador IPMC em uma configuração lado a lado ou multicamadas [111], [131]–[133]. Um sensor de bobina indutiva sem contato foi utilizado no trabalho de Wang et al. [134] para detectar a distância até a ponta do IPMC em uma bomba sem válvula de câmara dupla.

A seguir, serão abordados assuntos de visão computacional e de máquina, com aplicações em controle de IPMC, esses conceitos fundamentaram a utilização dessas técnicas no sensor de *feedback* proposto neste trabalho.

2.5.2 Sintonia de controlador

A seleção dos parâmetros do PID, ou seja, a sintonia dos controladores PID é uma etapa crucial no projeto do controlador geral. É possível classificar os métodos de sintonia em duas grandes categorias: experimental e analítica. Os métodos analíticos partem de um modelo matemático conhecido da planta do processo e, portanto, basta ajustar os parâmetros de acordo com o modelo e então atribuir os pólos. Os pólos são distribuídos de forma a responder adequadamente a um transiente [135]. Assim é possível determinar o polinômio característico em malha fechada.

Os métodos experimentais, muitas vezes chamados de métodos práticos consistem em analisar o comportamento do processo e realizar o ajuste da sintonia por meio de fórmulas já estabelecidas. Nesse tipo de método encontram-se os de Ziegler e Nichols (ZN) [136]. Existem basicamente dois métodos de ZN, o método 1 aplicado na sintonia de controladores PID em malha aberta e o método 2 aplicado em malha fechada. Neste trabalho utilizou-se o método 2 para

realizar a sintonia do controlador PID. Esse método consiste em ajustar os parâmetros PID de forma experimental. Assim, é necessário ajustar os termos $P = X$, $I = 0$ e $D = 0$, onde X , é um número pequeno e será incrementado paulatinamente até que o sistema apresente oscilações periódicas.

Após encontrar as oscilações periódicas, deve-se encontrar o ganho crítico (K_{cr}) e o período crítico (P_{cr}), com essas informações encontradas, utiliza-se uma tabela para encontrar a sintonia aproximada.

A

Tabela 2.2 apresenta as fórmulas do método 2 de ZN utilizadas para sintonizar o controlador.

Tabela 2.2 - Fórmulas do método 2 de ZN

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 P_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

2.5.3 Técnicas de visão computacional no controle do IPMC

A utilização de técnicas de visão computacional é aplicada em um sistema de controle por meio da utilização de câmeras que capturam imagens da posição do atuador retornando-as para o comparador do sistema. Essa captura é realizada por algoritmos de visão computacional que, muito rapidamente, realizam a criação e inspeção do modelo na imagem em tempo real. Essas informações são comparadas retornando para o sistema de controle que, realiza uma relação matemática entre a posição atual da ponta do atuador para com a posição ajustada. Por fim, o sistema utiliza uma função matemática para minimizar o erro entre o as posições fornecendo maior ou menor tensão.

2.5.3.1 Visão Computacional

A visão computacional é a tecnologia e ciência responsável pela forma como um computador enxerga o meio à sua volta, extraindo informações significativas a partir de imagens capturadas por câmeras de vídeos, sensores, scanners, entre outros dispositivos. Essas informações permitem reconhecer, manipular e pensar sobre os objetos que compõem a imagem [137].

Um sistema de visão computacional necessita diversos componentes que estão interligados e dependem um do outro para funcionar: aquisição, pré-processamento, segmentação, extração de características e reconhecimento [138].

Dentro da área de visão computacional, existem algumas subáreas de pesquisa que incluem: reconhecimento, movimento, reconstrução de cena e restauração de imagens. Cada uma das áreas abaixo utiliza um conjunto de técnicas de visão computacional [138]

Reconhecimento: determina se uma imagem contém ou não um dado objeto, uma dada característica ou uma dada atividade. Uma variedade de problemas de reconhecimento é descrita na literatura: **a)** reconhecimento: uma ou várias classes aprendidas ou pré-definidas de objetos podem ser reconhecidas, geralmente em conjunto com sua posição em imagem bi e tridimensionais; **b)** identificação: uma instância de um objeto pode ser reconhecida, como, identificação de face, impressão digital e reconhecimento de veículos; **c)** detecção: a imagem é digitalizada em condição específica podendo ser usada posteriormente para comparar com outra imagem; **d)** movimento: Diversas tarefas estão relacionadas a estimativa do movimento, na qual uma sequência de imagens é processada para produzir uma estimativa da velocidade em cada ponto da imagem; **e)** reconstrução de cena: dada uma ou mais imagens ou vídeos de uma cena, a reconstrução visa computar um modelo tridimensional da cena baseado em pontos, texturas e cores; **f)** Restauração de imagens: seu principal objetivo é a remoção de ruídos.

Dentro da grande área de visão computacional, encontram-se diversas outras áreas, e uma muito importante, é a visão de máquina, utilizado na

indústria para automação de processos por meio de reconhecimento de imagens com câmeras de alta velocidade. Essa metodologia de automação, é de fato muito importante, inclusive para o desenvolvimento deste trabalho, e, portanto, está detalhada abaixo.

2.5.3.2 Visão de máquina

A visão de máquina abrange todas as aplicações industriais e não industriais nas quais uma combinação de *hardware* e *software* fornece orientação operacional para dispositivos na execução de suas funções com base na captura e processamento de imagens. Embora a visão computacional industrial use muitos dos mesmos algoritmos e abordagens das aplicações acadêmicas da visão computacional, as restrições são diferentes [23].

Em IPMC, alguns autores já desenvolveram um sistema de controle utilizando essa técnica. Anis et al. [139] apresentaram um sistema robótico de manipulação para selecionar automaticamente de células vivas e transferí-las para locais específicos de análise. Nesse sistema usaram um *feedback* baseado em visão computacional e controle de processo em malha fechada. Esse *feedback* foi usado para controlar a seleção e captura de células, além de verificar a distribuição de células. Os autores comentam que obtiveram ótimos resultados fazendo uso desta técnica.

Tsiakmakis et al. [140], apresentaram um sistema em malha fechada de processamento de imagens para a medição de pequenos movimentos de IPMC no ar e dentro da água. A técnica proposta por ele baseava-se na extração das informações apropriadas de imagens de um vídeo. Medindo o tempo entre as imagens foi possível calcular os deslocamentos e velocidade do movimento da ponta do IPMC. Utilizou um algoritmo de visão computacional que reconhece automaticamente a borda do objeto que está em deslocamento, por fim, comparou o sistema dele com um controlado a laser e obteve bons resultados. Para melhorar os resultados de resposta do seu sistema, posteriormente Tsiakmakis e Laopoulos [141] utilizaram processamento paralelo em GPU (Unidade de Processamento Gráfico) com a plataforma CUDA (Arquitetura de

Dispositivo de Computação Unificada) e obtiveram uma melhoria de 3x no tempo de resposta do IPMC.

Ao abordar sobre o algoritmo de visão de máquina, o processo de correspondência de padrões consiste em duas etapas: aprendizado e correspondência. Durante o estágio de aprendizado, o algoritmo extrai informações do valor do contraste em escala de cinza. Assim, o algoritmo organiza e armazena as informações de uma maneira que facilite a pesquisa mais rápida na imagem de inspeção. Portanto, as informações aprendidas durante esse estágio são armazenadas como parte da imagem do modelo.

Durante o estágio de correspondência, o algoritmo extrai informações do valor do contraste em escala de cinza (correspondendo às informações aprendidas no modelo). Em seguida, o algoritmo encontra correspondências localizando regiões na imagem de inspeção onde a correlação cruzada mais alta é observada.

Esse algoritmo utiliza o método de correlação cruzada normalizada para encontrar um modelo em uma imagem de inspeção. Segundo Koniar et al. [142], o método de correlação cruzada da imagem segue o conceito básico de correlação: considerando uma sub-imagem $w(x, y)$ de tamanho $K \times G$ dentro de uma imagem $f(x, y)$ de tamanho $M \times N$, onde $K \leq H$ e $L \leq M$. A correlação entre $w(x, y)$ e $f(x, y)$ em um ponto (i, j) é dada por:

$$C(i, j) = \sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=1}^{K-1} w(x, y) f(x + i, y + j) \quad (3.2)$$

A correlação cruzada normalizada da imagem é definida como:

$$R(i, j) = \frac{\sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=1}^{K-1} (w(x, y) - \bar{w})(f(x + i, y + j) - \bar{f}(i, j))}{[\sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{K-1} (w(x, y) - \bar{w})^2]^{\frac{1}{2}} [\sum_{x=0}^{L-1} \sum_{y=0}^{K-1} (f(x + i, y + j) - \bar{f}(i, j))^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

A correlação é o processo de mover o modelo ou sub-imagem w pela área da imagem e calcular o valor C nessa área, conforme ilustrado na Figura 2.11.

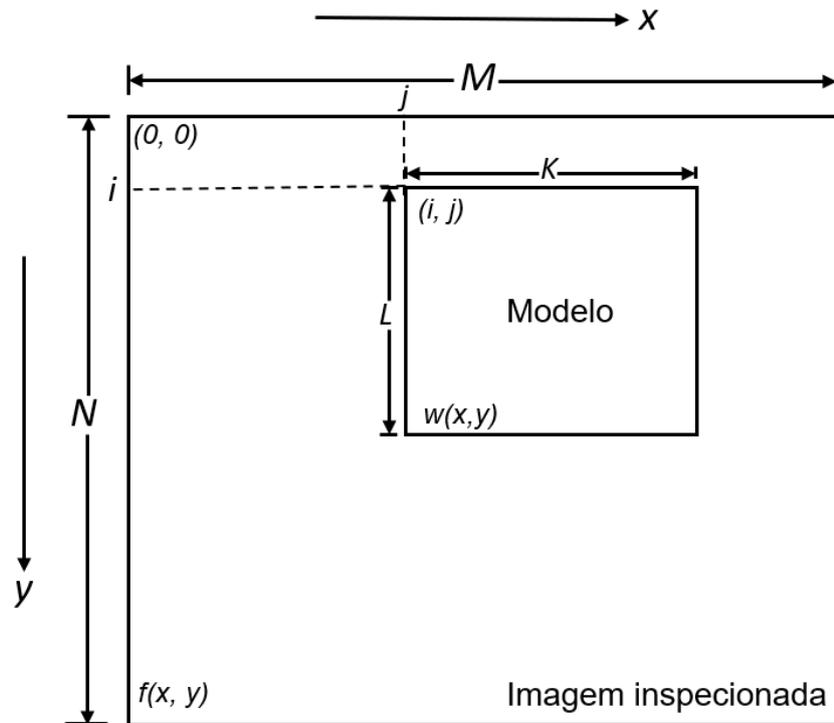


Figura 2.11 - Método de busca do modelo na imagem de inspeção [142].

Isso envolve a multiplicação de cada pixel no modelo pelo pixel da imagem sobreposta e a soma dos resultados em todos os pixels do modelo. O valor máximo de C indica a posição em que w corresponde melhor a f .

Para ilustrar um exemplo de aparato experimental para sistema de controle utilizando processamento de imagens é ilustrado na Figura 2.12.

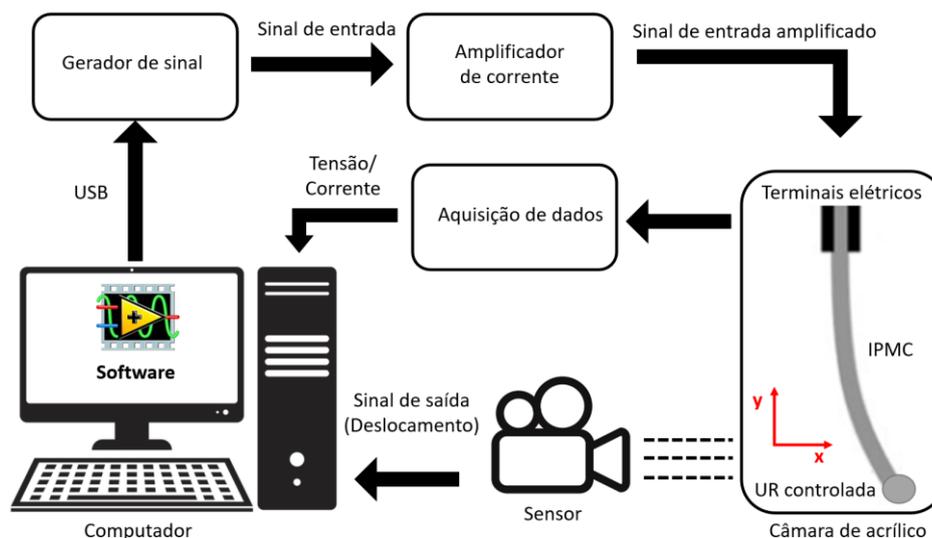


Figura 2.12 - Exemplo de aparato experimental para monitorar e controlar IPMC

Inicialmente é necessário estimular eletricamente o IPMC de maneira correta e com isso, ser possível capturar/processar imagens dos seus movimentos por um sensor, e então, realizar a ação de controle.

O aparato experimental utilizado neste trabalho seguiu essa metodologia. Um computador com *software* adequado foi conectado via interface USB ao gerador de sinal, que após passar por um amplificador de corrente, segue até os terminais conectados ao atuador IPMC. Ao ajustar uma posição via software, o sistema fornecerá tensão sobre os terminais elétricos, resultando na movimentação do IPMC. Em tempo real, as imagens são coletadas por um sensor de *feedback* (neste trabalho, utilizou-se uma webcam) que as processou. Esse processamento é basicamente procurar um padrão criado em uma imagem em uma imagem de inspeção, e assim, comparar as posições entre elas, conforme ilustrado na Figura 2.13 abaixo.

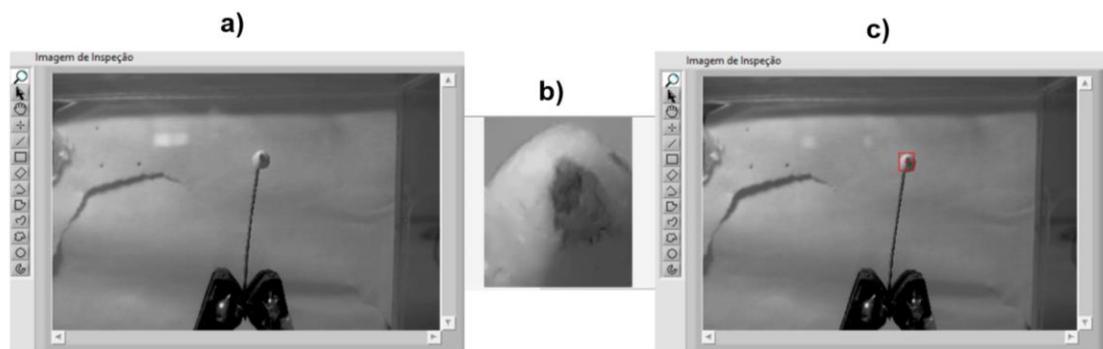


Figura 2.13. **a)** imagem de inspeção; **b)** modelo; **c)** modelo encontrado

A Figura 2.12. **a)** apresenta a imagem de inspeção antes da criação do modelo; a Figura 2.12. **b)** apresenta o modelo criado e por fim, a Figura 2.12. **c)** apresenta a imagem de inspeção já com o modelo encontrado.

Na descrição acima, um processo básico de monitoramento, criação e busca do modelo na imagem de inspeção aplicado para controle de IPMC é exemplificado. Maiores detalhes estão na seção 3.3.4.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção, serão descritos os materiais e métodos utilizados para a montagem e desenvolvimento dos *softwares* para controle de UR e de trajetória do atuador IPMC.

3.1 Materiais

A matriz polimérica utilizada neste trabalho foi o Nafion® 117 na forma de filmes. Na Tabela 3.3 são descritas algumas de suas propriedades. Esta série de polímeros possui peso molecular equivalente a 1100 g mol^{-1} por cadeia lateral.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas do Nafion 117^a [143]

Espessura da membrana (μm)	Condutividade (S cm^{-1})	Resistividade ($\Omega \text{ cm}$)
200 μm	0,100	10

^a Nafion 117 imerso em água deionizada à 25°C [143].

Para a preparação das amostras de IPMC utilizou-se os seguintes reagentes: água deionizada, ácido clorídrico (HCl), sal de complexo de amino platina ($[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$), Borohidreto de Sódio (NaBH_4) e Hidróxido de Amônia (NH_4OH).

Os sais utilizados para incorporação dos contra-íons foram: cloreto de lítio (LiCl), cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl).

As misturas e reações foram realizadas em béqueres de vidro de 100 e 250 mL. Um bastão de vidro foi utilizado para acertar as amostras quando necessário. Também foi utilizado um *cleaner* ultrassônico e um agitador termostatizado com barra magnética pequena.

Para o desenvolvimento dos sistemas de controle de umidade relativa, envio e coleta de dados e sistema de controle foram utilizados: placa de controle

Arduino Uno, módulo relê 12 volts – 2 canais, minicompressores, água destilada, sílica gel, câmara de acrílico, sensor de umidade e temperatura DHT22, *webcam* Logitech – Modelo C920, fonte chaveada 12 volts, amplificador operacional de corrente OP27GP, resistor de 10 Ω , módulo da National Instruments (NI) – MyDAQ e computador. Uma imagem do aparato experimental está ilustrada na Figura 3.14.

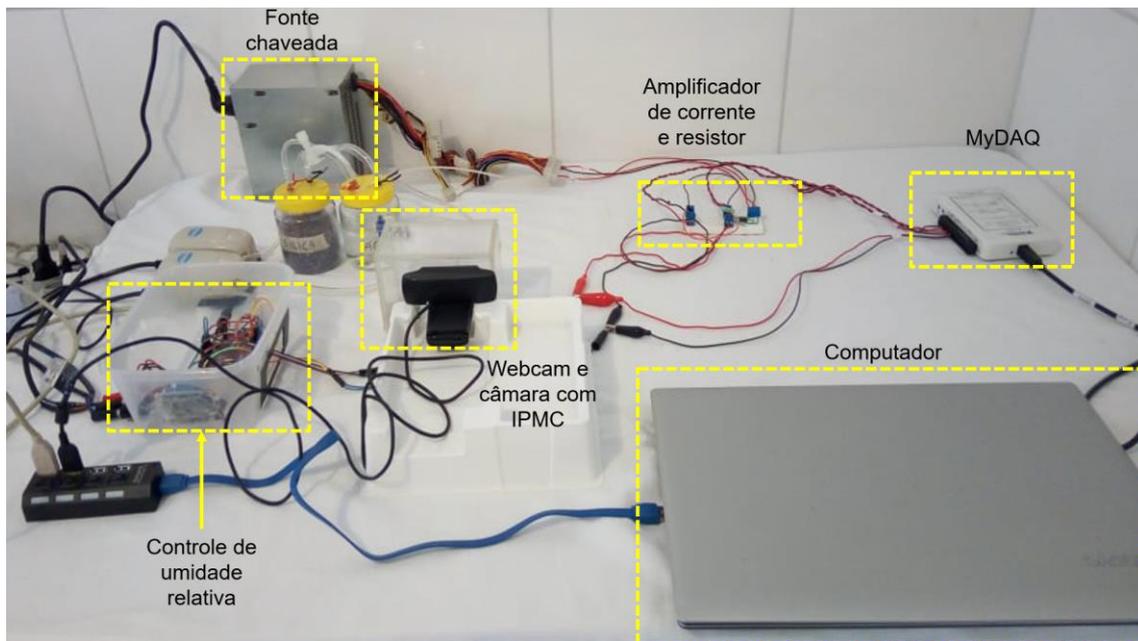


Figura 3.14 - Aparato experimental utilizado.

3.2 Métodos

O fluxograma contido na Figura 3.15, ilustra como foram adotados os métodos para se alcançar os objetivos propostos por este trabalho.

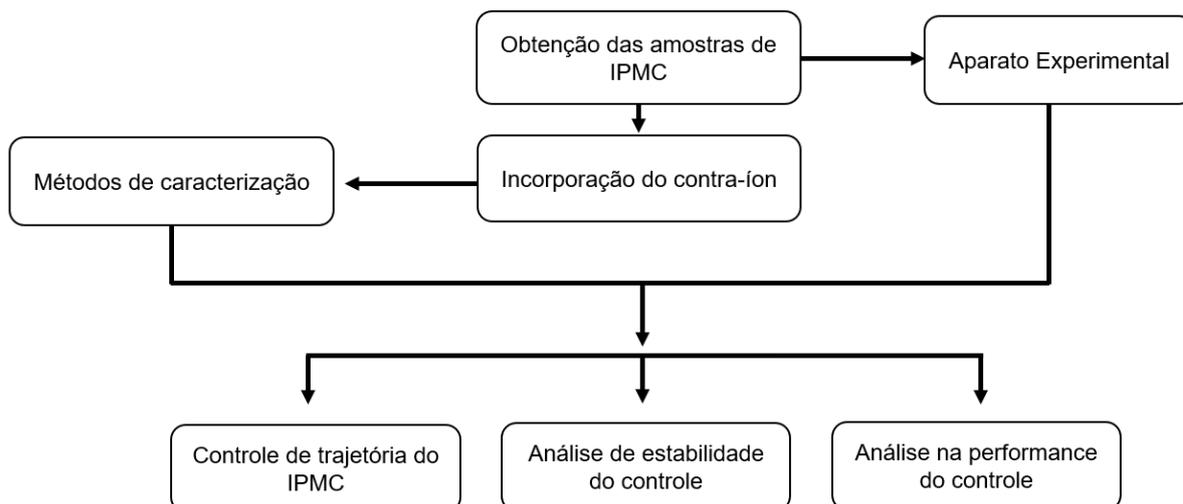


Figura 3.15 - Fluxograma dos métodos envolvidos durante a realização do trabalho.

Os detalhes do fluxograma estão descritos nas seções a seguir.

3.2.1 – Obtenção das amostras de IPMC

Este procedimento visa a obtenção de amostras de IPMC com boa qualidade e capazes de reagir mecanicamente a estímulos elétricos. Para isto foi utilizado o procedimento desenvolvido por Oguro [144] e otimizado por Hirano [45]. Assim, este método baseia-se na redução de íons adsorvidos pela membrana polimérica, e o procedimento pode ser dividido em três etapas conforme ilustrado na Figura 3.16.

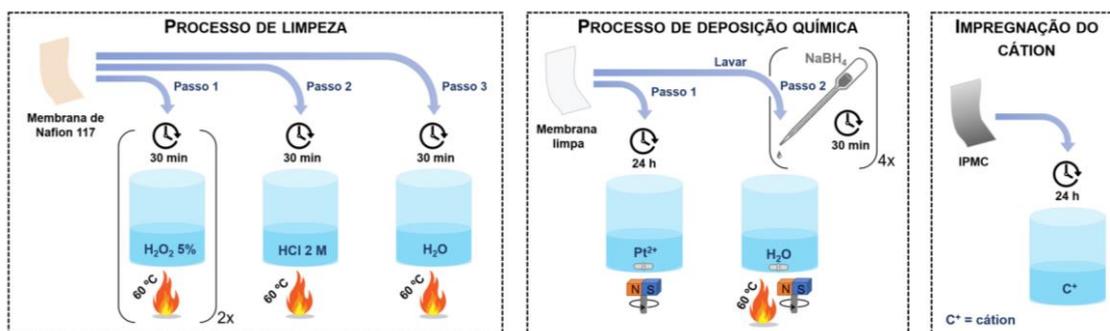


Figura 3.16 - Obtenção do IPMC

1) Limpeza e preparação da superfície da membrana: remoção das impurezas da superfície por meio do tratamento da membrana polimérica com uma solução peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 5% durante 30 minutos à 60 °C. Em seguida, em solução de HCl 2 mol.L⁻¹ durante 30 minutos a membrana foi aquecida à 60°C favorecendo a adsorção dos íons de Pt²⁺. Por fim, as amostras foram submersas em água deionizada por 30 min à 60 °C;

2) Adsorção: as amostras foram submersas em solução de cloreto de tetramino platina ($[\text{Pt}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$) – Sigma-Aldrich (concentração de 99,9%) - por 24 horas objetivando a adsorção de Pt²⁺ nos canais iônicos da membrana. Para calcular a quantidade de solução é importante considerar a área da membrana em ambos os lados, e assim, a solução deve conter 3 mg de Pt/cm²;

3) Redução das espécies de platina: Após às 24 horas de submersão, adicionou-se a cada 30 minutos 5 ml de uma solução diluída de NaBH₄ a temperaturas de 60°C mantidas sob agitação por um tempo total de 120 minutos. Esse processo tem finalidade formar um filme, reduzindo os íons de Pt²⁺ em platina metálica na superfície da membrana. Durante essa etapa, os íons Pt²⁺ migram para a superfície externa da membrana e, reduzidos a Pt metálica, formam os eletrodos primários do compósito.

3.2.2 – Incorporação do contra-íon

Para o processo de incorporação do contra-íons, a amostra foi submersa em ácido clorídrico com concentração de 0.5 mol L⁻¹ durante 24 horas, em temperatura ambiente, para que íons H⁺ entrassem nos canais iônicos. O mesmo processo foi realizado para o cloreto de lítio (LiCl), cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl) na mesma concentração, para condicionar as amostras com íons Li⁺, Na⁺ e K⁺, respectivamente.

3.3 Aparato Experimental

Nessa seção será detalhada todo o aparato experimental desenvolvido para a realização dos ensaios que avaliaram o sistema de controle desenvolvido

neste trabalho. A Figura 3.17, ilustra um fluxograma com as etapas de desenvolvimento do aparato experimental.

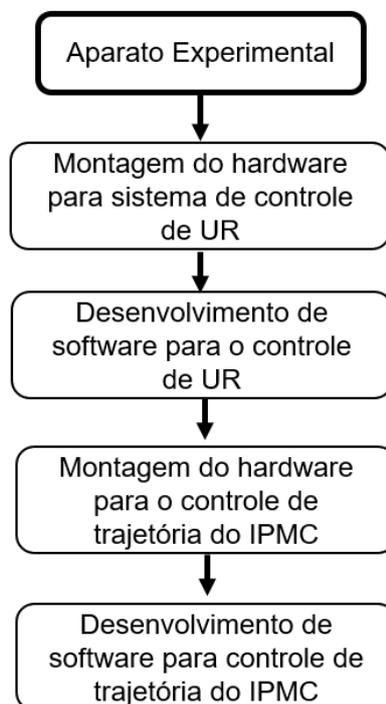


Figura 3.17 - Fluxograma detalhado do aparato experimental

3.3.1 – Montagem do *Hardware* para o Sistema de Controle de UR.

O sistema de controle de umidade foi desenvolvido utilizando plataforma de prototipação Arduino Uno R3 Atmega 328, cabos jumpers, relê 12 V dois canais, *proto board* de 170 pontos, dois minicompressores (marca MiniJian, modelo NS350 com potencia de 3 W e 60 Hz), sensor de umidade e temperatura do modelo AM2302 DHT22 (com precisão de medição de UR: $\pm 2\%$ e temperatura: $\pm 0,5$ °C), dois recipientes de vidro com tampa plástica de 250 ml, um para acondicionar água destilada e outro, sílica gel, câmara de acrílico com dimensões de 90 mm x 110 mm x 65 mm com suporte central estilo “grampo” para fixar a amostra de IPMC. O *hardware* do controle de UR é ilustrado na Figura 3.18.

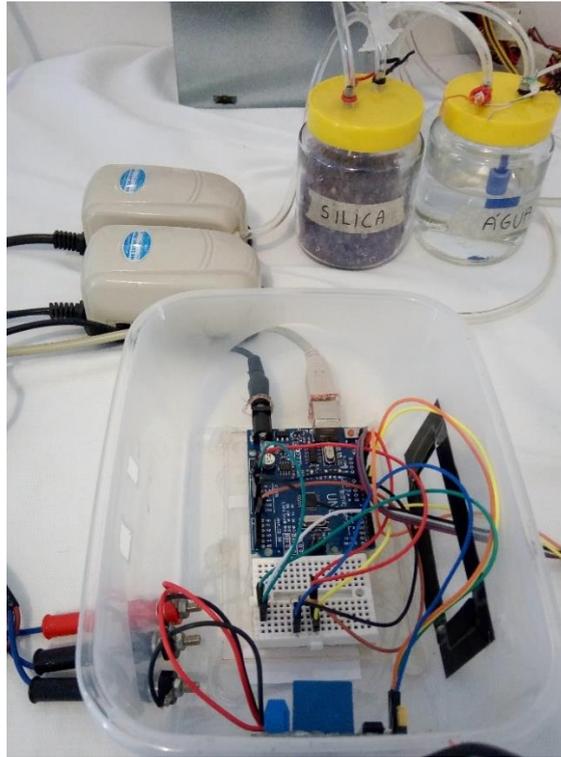


Figura 3.18 - *Hardware* montado do sistema de controle de UR

3.3.2 – Desenvolvimento do *Software* para o Sistema de Controle de UR

O desenvolvimento do *software* para controle de umidade foi realizado no ambiente de desenvolvimento do Arduino, e está disponível e detalhado no APÊNDICE A.

Basicamente, o usuário informa a UR desejada e o sistema realiza a leitura de três umidades por meio do sensor DHT22, cujo sensor, não necessita de calibração prévia, perfazendo uma média aritmética simples das três leituras, e compara, a média das umidades com o valor ajustado pelo usuário, caso esse valor seja igual, o sistema se mantém inerte, caso esse valor seja menor, é acionado o relé de ativação do microcompressor que irá bombear ar para o recipiente que contém água deionizada e assim irá lançar ar úmido para dentro da câmara de acrílico. Caso o valor médio seja maior, é acionando o segundo microcompressor soprando ar para o recipiente que possui sílica gel, e assim, o ar seco chega até a câmara de acrílico. Nos testes o sistema funcionou

corretamente e apresentou uma precisão no controle da UR de aproximadamente 5% mantida entre todo intervalo de umidade.

3.3.3 – Montagem do *Hardware* para o controle do IPMC

A montagem do *hardware* de controle foi disposta em duas partes: **i)** uma fonte chaveada de computador (110/220 volts – potência de saída 200 W) foi utilizada para alimentar o sistema. A fonte chaveada possui diversas conexões com tensões distintas (+3,3, -5, +5, +12 e -12 volts), no entanto, para o sistema utilizou-se somente as conexões de +12 (cor amarela) e -12 volts (cor azul). Ambas as conexões foram ligadas à uma *protoboard* que possui um amplificador de corrente (OP27GP) e resistor de 10Ω – com potência 0,25 W e tolerância de 5%. O amplificador de corrente e tensão é um requisito para o funcionamento adequado do IPMC, já que segundo a literatura [45], o mesmo necessita de correntes acima de 200 mA, que é valor nominal do equipamento MyDAQ da NI. Após a tensão passar pelo amplificador de corrente a mesma segue para três conexões distintas. A primeira conexão é uma porta analógica de saída (AO-0) do MyDAQ. Essa, responsável por gerenciar - via *software* - a DDP necessária para alimentação do IPMC no interior da câmara de acrílico. A segunda conexão passa pelo resistor, e então, é conectada à uma porta analógica de entrada (AI-0) com o intuito de fazer a leitura da corrente utilizando a lei de Ohm. Uma terceira conexão conectada à uma porta analógica de entrada (AI-1) é responsável por fazer a leitura da DDP. Uma representação do circuito montado é ilustrada no APÊNDICE B.

Na segunda parte, **ii)** uma *webcam* CMOS foi fixada na parte frontal da câmara de acrílico a uma distância de aproximadamente 1,0 cm, sendo assim, a uma distância de aproximadamente 4 cm da amostra condicionada em UR controlada no interior da câmara. Utilizou-se uma luminária de led para melhor visualização do IPMC em atuação, minimizando problema de luminosidade. A Figura 3.19 ilustra a bancada de ensaios com os equipamentos mencionados.

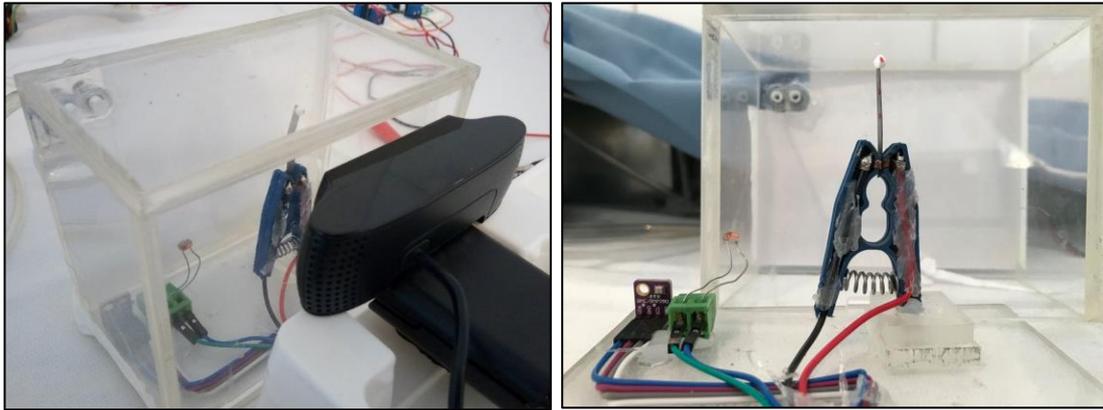


Figura 3.19 - Câmera utilizada para realização dos ensaios e suporte do IPMC.

Como é possível visualizar na Figura 3.19, na ponta do IPMC foi fixado um pequeno fragmento de isopor na posição axial. O objetivo com a marcação foi de aumentar a área de visualização da ponta do IPMC em relação a imagem de inspeção em tempo real capturada pela *webcam* e assim, melhorar a leitura do sistema de reconhecimento de imagem. Esses detalhes serão discutidos adiante.

3.3.4 – Desenvolvimento do **Software** para o controle de trajetória do IPMC

O *software* utilizado para o desenvolvimento do projeto foi o *software LabVIEW Student Software Suite 2018 (64-bits)*. O mesmo é uma suíte de *softwares* voltados a aplicações acadêmicas e de engenharia fornecendo recursos de modulação, medição, inspeção e desenvolvimento [145]. Em conjunto utilizou-se o módulo de visão de máquina, chamado *Machine Vision*. Esse módulo implementa e executa tarefa de inspeção da visão de máquina, incluindo dentre outras funcionalidades, inspeção de imagens em tempo real para a realização do controle do IPMC.

O controlador utilizado para o projeto foi o PID.ni, esse bloco de código está contido no *LabVIEW* e sua implementação foi realizada utilizando somente as componentes proporcional (P) e integral (I), caracterizando assim um controlador PI. Todo o detalhamento dos *softwares*, juntamente com os códigos estão disponíveis e detalhados no APÊNDICE C.

A Figura 3.20 ilustra a integração do sistema de visão de máquina com o controlador PI, ambos desenvolvidos neste trabalho.

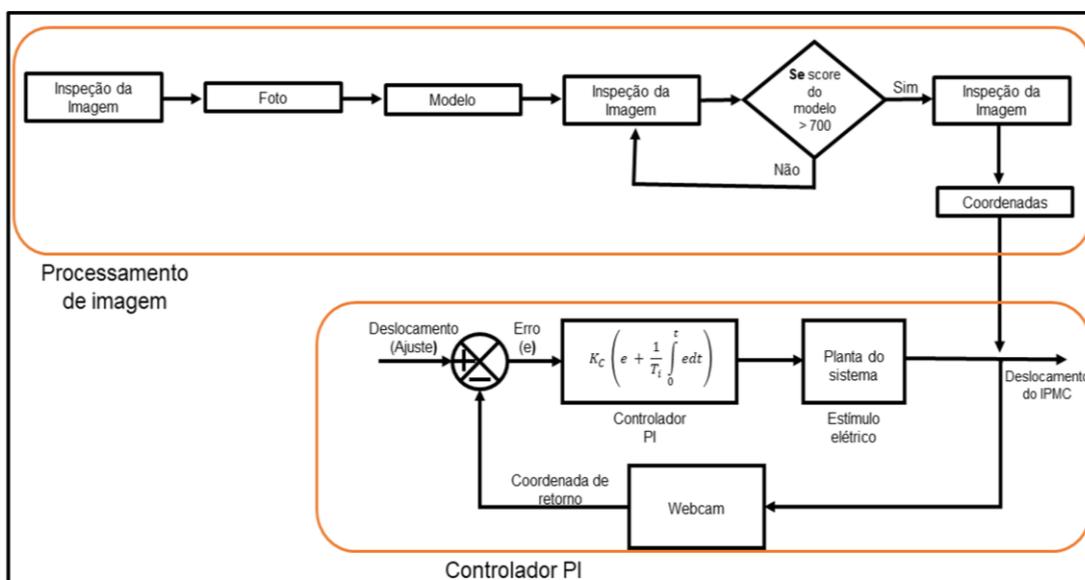


Figura 3.20 - Integração entre sistemas de visão de máquina e controle PI.

Em suma, o sistema de visão computacional reconhece o modelo criado da ponta do IPMC e passa as coordenadas da posição no eixo x e y (conforme os ensaios preliminares, somente a do eixo x era necessária para alimentar a variável de processo do controlador PI). Assim, o controlador compara a posição atual do IPMC em relação a trajetória ajustada pelo usuário. Essa diferença de posição, faz com que o controlador estimule eletricamente o IPMC com a DDP necessária para que o mesmo se desloque até a posição desejada e mantenha-o estável.

Uma imagem do painel frontal do sistema é apresentada na Figura 3.21 e Figura 3.22. É importante salientar que nos ensaios preliminares, problemas foram encontrados, principalmente no que tange à procura do modelo na imagem de inspeção. Isso ocorreu porque o modelo era criado com base na ponta do IPMC (Figura 3.21), e como se trata de um filme, a área de superfície lateral é pequena, fazendo com que o sistema tivesse dificuldades para encontrar o modelo na imagem de inspeção ao passo que o IPMC se movimentava. E com

isso, decidiu-se utilizar uma marcação na ponta do IPMC para maximizar a área de reconhecimento e consequentemente melhorando o acerto do algoritmo no sistema (Figura 3.22)

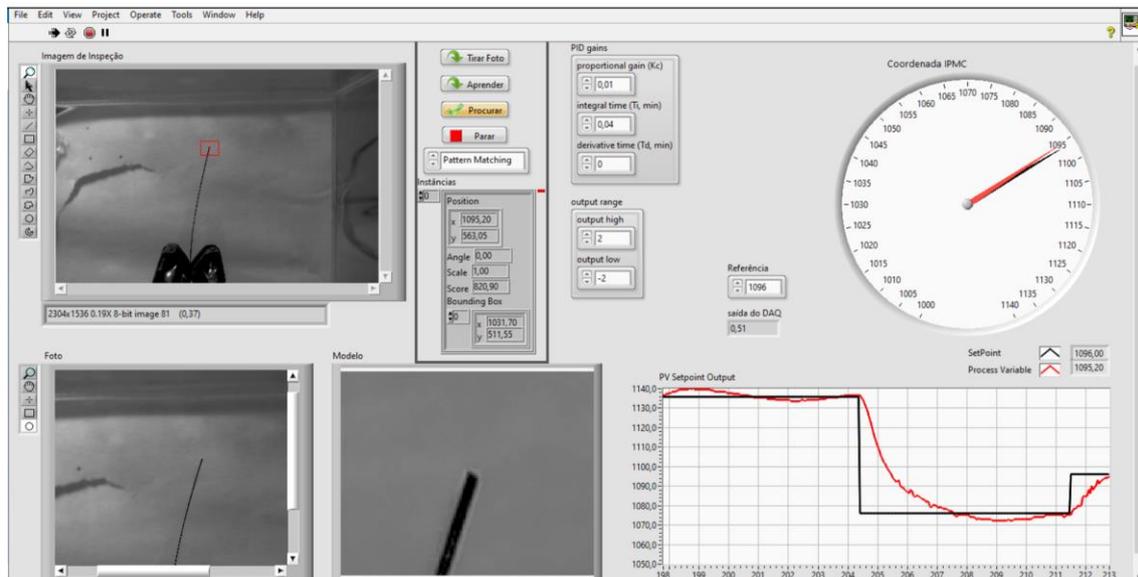


Figura 3.21 - Painel frontal do sistema desenvolvido sem a marcação na ponta do IPMC

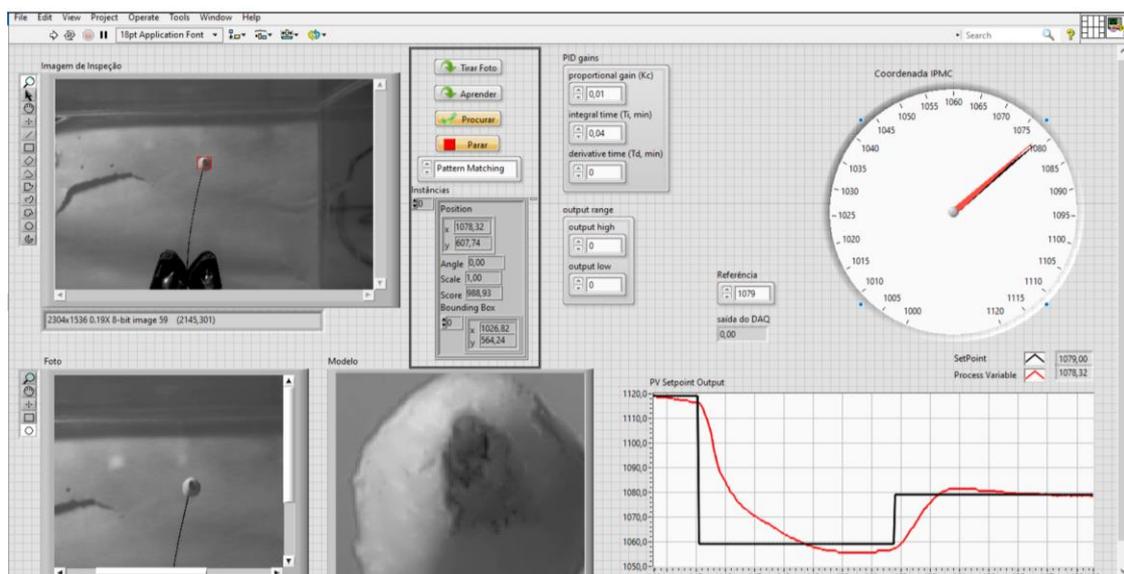


Figura 3.22 - Painel frontal do sistema desenvolvido com a marcação na ponta do IPMC

Ao avaliar a Figura 3.22, é perceptível que o modelo criado com a marcação na ponta do IPMC apresenta uma área muito maior do que a

apresentada no ensaio sem a marcação na ponta. Essa área maior, melhorou o índice de acerto do algoritmo no momento de reconhecer o modelo.

Além disso, com a finalidade de mostrar o efeito do aumento da área de reconhecimento do modelo do IPMC, foi acrescentado no sistema de reconhecimento, um relatório com o índice de acerto do algoritmo durante a realização do ensaio e o detalhamento desse resultado está na seção 4.1

3.3.4.1 Sintonia do controlador

Para sintonizar o controlador desenvolvido neste trabalho, realizaram-se alguns testes iniciais com valores para X variando entre 0,2 até 1. O objetivo era encontrar dentro desse intervalo um X que resultasse em oscilações periódicas.

Para essa determinação, a amostra foi condicionada na câmara de acrílico em UR = 90% por 60 min. Após isso, ajustou-se a DDP em -2 a 2v e o ensaio foi iniciado em tempo definido de 40 segundos.

Abaixo, na Figura 3.23, está sendo ilustrado os resultados obtidos após o ensaio realizado para os valores de X discriminados acima.

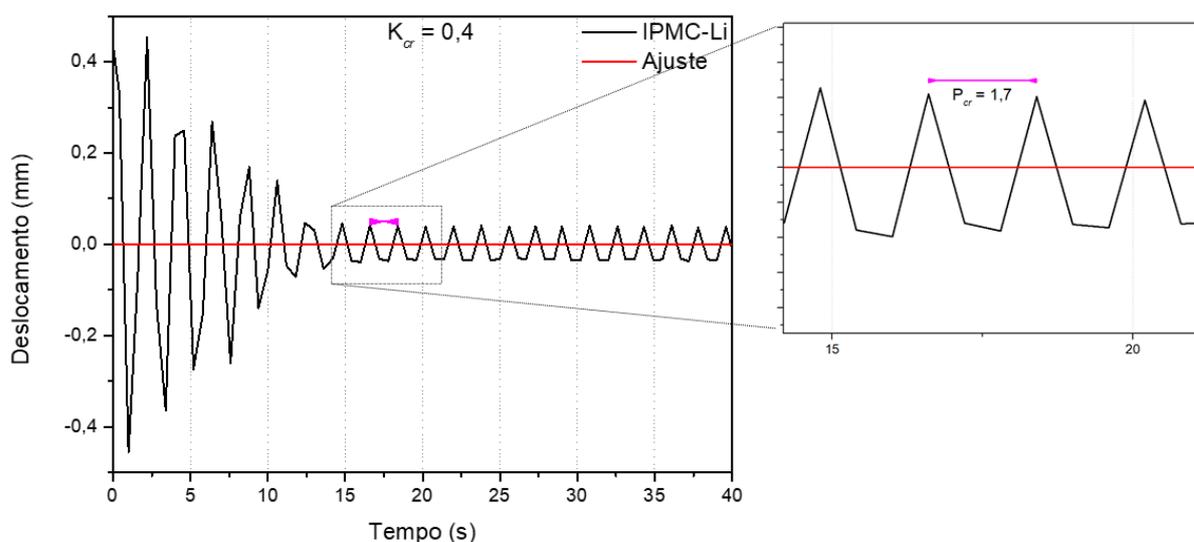


Figura 3.23 - Ensaio para sintonia de controle

Ao iniciar o ensaio uma posição de trajetória foi ajustada e então o controlador estimulou eletricamente IPMC para movê-lo até a posição desejada. Como somente a componente proporcional (P) está com valor, pode-se concluir que esse valor de P é o valor de ganho crítico, expresso por K_{cr} . Próximo aos 12 segundos, o IPMC apresenta oscilações periódicas em intervalos de aproximadamente 1,7 segundos. Portanto, ao final do ensaio, se obteve o valor de K_{cr} e P_{cr} , e os valores foram substituídos na tabela de ZN obtendo-se uma sintonia aproximada.

Esses valores estão expressos na Equação 3.4 e 3.5 respectivamente

$$Kp = 0,45 \cdot K_{cr} \quad (3.4)$$

$$Kp = 0,45 \cdot 0,4$$

$$\mathbf{Kp = 0,18}$$

$$Ti = \frac{1}{1,2} \cdot P_{cr} \quad (3.5)$$

$$Ti = \frac{1}{1,2} \cdot 1,7$$

$$\mathbf{Ti = 1,41}$$

A partir dos valores de sintonia obtidos, foram realizados alguns ensaios preliminares para avaliar a eficácia do sistema de controle. Porém, no decorrer dos ensaios percebeu-se uma instabilidade no controle ao passo que se modificava a UR e o contra-íon. Assim, realizou-se um ajuste fino das componentes do PI obtidos anteriormente.

Após vários ajustes de sintonia, foi possível controlar o IPMC em diversos cenários distintos (UR e contra-íons distintos), e esses novos valores ajustados foram 0,01 para a componente proporcional (P) e 0,04 para a componente integral (I). Os valores obtidos nos ajustes finos foram inferiores ao obtidos pelo método de ZN. Isso se deve ao fato de que, cada contra-íon impregnado na amostra juntamente com variações de UR do ambiente refletem em comportamentos mecânicos distintas (mais rápidos ou mais lentos) do atuador [3]. Contudo, os resultados da sintonia fina se aproximam aos encontrados na

literatura [20], [101], [146], onde a baixa frequência do movimento, fazem com que as componentes tenham valores pequenos [147].

Outra consideração importante a mencionar é, com os valores da sintonia fina obtidos, é possível encontrar a função de transferência e assim poder modelar os resultados. No entanto, essa etapa não faz parte do escopo deste trabalho e será realizada em trabalhos futuros.

3.4 Métodos de Caracterização

Os métodos de caracterização aqui denominados, fazem parte de métodos já conhecidos e utilizados para caracterizar materiais. Neste sentido, dentre os comumente utilizados para caracterizar IPMCs, estão, estudo de absorção de água, microscopia eletrônica de varredura (MEV), quatro pontas, espectroscopia de impedância (EIS), cronoamperometria. Além dessas, uma técnica complementar que correlaciona o controle de trajetória com as propriedades do IPMC. Todos os ensaios foram realizados em duplicata e a média aritmética simples foi usada com resultado. Uma sequência das caracterizações realizadas está representada no fluxograma Figura 3.24.

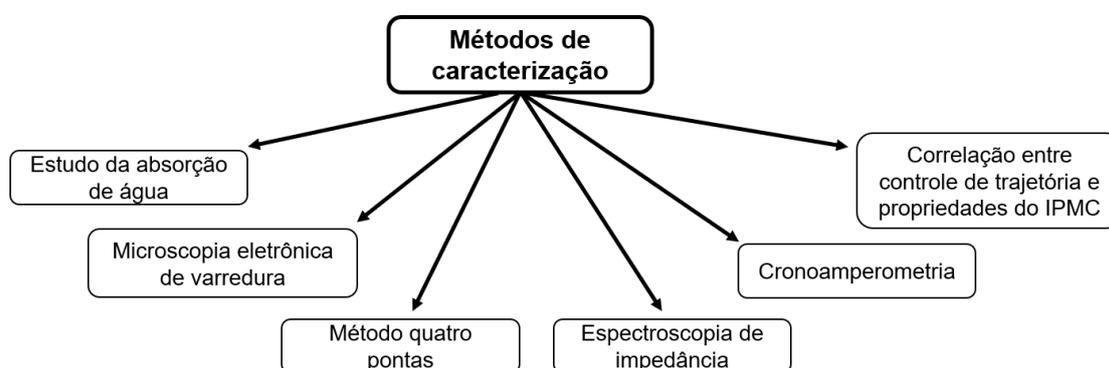


Figura 3.24 - Fluxograma com sequência das caracterizações realizadas

3.4.1 Estudo da absorção de água

O objetivo desse ensaio foi avaliar a influência do contra-íon (tipo de tamanho) e das diferentes UR no processo absorção de água no IPMC. E,

portanto, o ensaio foi realizado utilizando os diferentes contra-íons (H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+) em diferentes UR (30, 60 e 90%).

Para tanto, a amostra foi impregnada com o contra-íon por 24 horas e após esse processo foi seca em estufa a vácuo a $80^{\circ}C$ por 24 horas. Posteriormente a amostra foi condicionada em ambiente com UR controlada e pesada em balança de precisão (0,001g) modelo DV215CD em intervalos de aproximadamente 20 minutos por 6 horas. O percentual de absorção de água foi calculado pela Equação 3.6:

$$\%Absorção\ de\ água = \%100 \left[\frac{M(úmida) - M(seca)}{M(seca)} \right] \quad (3.6)$$

onde $M(úmida)$ é a massa da amostra depois da absorção de água e $M(seca)$ é a massa da amostra completamente seca.

3.4.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para as análises morfológicas utilizou-se a técnica de MEV. Essa técnica na análise dos IPMCs se resume em duas etapas, a primeira para analisar a região superficial do eletrodo; já a segunda, na avaliação interfacial entre eletrodo e matriz polimérica.

Na avaliação da região superficial do eletrodo é possível identificar a formação do eletrodo, tamanho médio do grãos, avaliar defeitos de formação e o mapa químico. Já na região interfacial é possível identificar como foi a adesão polímero/platina e a espessura do eletrodo formado no processo de deposição.

O MEV foi realizado posteriormente aos ensaios de controle e utilizou-se os microscópios Philip XL - 30 FEG, INSPECT, Quanta 400 da marca FEI e o EDS INCAx-sight modelo 6650 disponíveis no Laboratório de Caracterização Estrutural e no Centro de Caracterização de Materiais da UFSCar.

3.4.3 Caracterização elétrica

As caracterizações elétricas em materiais têm um papel importante na especificação das suas propriedades elétricas. Neste trabalho, utilizou-se três métodos de caracterização elétrica, método quatro pontas, espectroscopia de impedância e cronoamperometria.

O método de quatro pontas, teve objetivo de avaliar a resistência dos eletrodos, sendo possível avaliar se os eletrodos possuíam propriedades elétricas similares. O método de espectroscopia de impedância teve intuito de medir as partes real e imaginária da impedância complexa em função da frequência [148], isso em temperatura ambiente e UR controlada (30, 60 e 90%). Já a cronoamperometria teve intuito de avaliar a corrente resultante dos processos faradaicos ocorrendo nos eletrodos em função do tempo.

3.4.3.1 Método quatro pontas

O método de quatro pontas é largamente utilizado para medir resistências de semicondutores. A técnica basicamente consiste em aplicar um potencial e medir a resistência da passagem de corrente entre as extremidades superficiais do eletrodo de platina do IPMC. Isto significa que, quanto maior for esse valor, mais difícil será para os elétrons percorrerem o material e isso afetará diretamente na flexão do atuador. Trata-se de um método não destrutivo, contudo, a pressão exercida pelas sondas de medida sobre a superfície dos eletrodos pode vir a danificá-los. Sendo assim, optou-se por realizar esse teste ao final de todos os ensaios. Além disso, a grande vantagem do método é a simplicidade da medida, incluindo-se o fato de não ser necessário um bom contato ohmico entre o eletrodo e a amostra

O equipamento utilizado para fazer essa medição foi o Ponte LCR digital de bancada MXB-821 da marca Minipa com tensão aplicada de 0,1 volts em frequência de 10 kHz. As condições utilizadas durante a medida foram de temperatura de aproximadamente 25°C e UR de aproximadamente 50%, além de serem realizadas em duplicada e a média aritmética simples foi utilizada como resultado do ensaio.

3.4.3.2 Espectroscopia de impedância (EIS)

A espectroscopia de impedância é uma técnica de grande utilidade para caracterizar o comportamento elétrico de materiais sólidos ou líquidos (iônicos, semicondutores e até mesmo dielétricos) e dispositivos eletrônicos. O procedimento padrão consiste em aplicar um estímulo elétrico, geralmente, uma tensão alternada do tipo senoidal e, em seguida, medir as partes (real e imaginária) da impedância complexa em função da frequência [149].

Este estudo é crucial para dimensionar as características do sinal elétrico necessário para ativar e controlar a deformação das amostras de IPMC [150]. Além disso, uma vez que as características de impedância do IPMC mudam com o grau de hidratação, a análise de impedância pode ser usada como uma verificação de qualidade para a operabilidade destes materiais como atuadores e compreensão de seu comportamento elétrico, permitindo um controle mais efetivo. Ademais, os dados de EIS fornecem informações sobre a difusão e os processos químicos que ocorrem no material, ou seja, permitem determinar os tempos característicos da migração iônica [150].

Para entender melhor o funcionamento eletroquímico desses dispositivos é imprescindível correlacioná-los com circuitos elétricos equivalentes. Assim, é possível desmistificar os mecanismos que ocorrem no interior do material. Na eletroquímica clássica, pode-se descrever o sistema por um eletrodo condutor de elétrons planar e um eletrólito condutor de íons [151]. As reações eletroquímicas ocorrem na superfície do eletrodo. Assim, o comportamento eletroquímico dessa interface pode ser descrito por diferentes modelos. Um modelo mais simples e comum é o modelo de Randles, ilustrado abaixo na Figura 3.25.

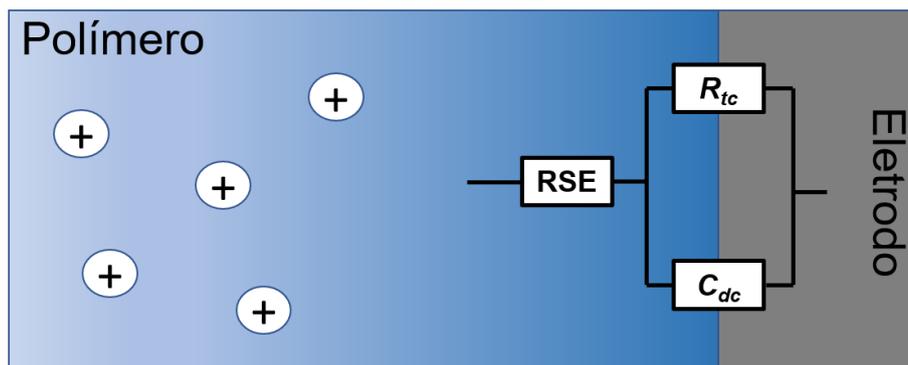


Figura 3.25 -Diagrama de um modelo simplificado de Randles, adaptado de [152].

A resistência em série equivalente RSE representa a soma das resistências do eletrodo, polímero e contatos elétricos. Em série com uma conexão paralela de resistência de transferência de carga R_{tc} e capacitância de dupla camada C_{dc} . Nesse diagrama, R_{tc} representa todas as reações faradaicas que ocorrem na superfície do eletrodo, sendo elas reversíveis e irreversíveis. Em contrapartida, C_{dl} descreve mecanismos de armazenamento de carga não faradaico, normalmente substituído por um elemento de fase constante (CPE, do inglês, *constant phase element*) para suposições não ideais [152].

Por fim, ao realizar essa caracterização, será possível correlacionar o comportamento do IPMC ao ser controlado com as características elétricas passivas, (resistivas, capacitivas e indutivas). Os experimentos foram conduzidos no equipamento impedancímetro, (*Solartron Analytical*) acoplado a um potenciostato/galvanostato (*Princeton Applied Research*). Uma câmara fechada foi utilizada para garantir o controle de umidade relativa do ar (30/60/90%) em torno da amostra por um intervalo de tempo superior a 12 horas.

3.4.3.3 Cronoamperometria

A cronoamperometria é uma técnica de avaliação de densidade de carga e as quedas ôhmicas das amostras de IPMC, sendo realizadas em modo dois eletrodos no intervalo de diferença de potencial de 0,5 a 2,0 volts com carga/descarga de 60 segundos entre cada aumento de 0,5 volt, sendo possível

observar o carregamento/descarregamento das amostras de IPMC em toda a faixa de diferença de potencial aplicado. Sendo o processo de carga e descarga dos dispositivos similar ao de circuitos RC (resistivo-capacitivo), as cargas acumuladas em todas as tensões aplicadas podem ser calculadas pela integração direta da curva cronoamperométrica (corrente (i) x tempo (t)). Estes testes foram realizados no equipamento PalmSens EmStat3+.

3.4.4 Correlação entre controle de trajetória e propriedades do IPMC

Investigar as propriedades IPMC utilizando técnicas de controle pode ser uma maneira de simples, fácil de implementar e de baixo custo para compreender comportamentos do material. Para isso, neste trabalho implementou-se um sistema de controle PI em malha fechada que além de controlá-lo pudesse ser possível investigar o comportamento do material frente ao método proposto.

A resposta a partir dessa técnica é identificar qual contra-íon é mais adequado ao IPMC baseado em Nafion® e em qual ambiente de trabalho o mesmo apresenta melhor desempenho. Essa técnica investigativa foi concebida para complementar as técnicas caracterização tradicionais e assim propiciar aos pesquisadores dessa área um método complementar de baixo custo.

Estudar as características do IPMC pelo método de controle consiste em ajustar uma trajetória para o IPMC (dentro de um espectro possível) no sistema, definindo uma DDP máxima necessária para que seja efetivado o movimento e então o sistema de controle estimula eletricamente o atuador IPMC. Como resposta, é observado o tempo necessário para o atuador IPMC estabilizar na posição ajustada. A estabilização da posição consiste em o atuador variar $\leq 5\%$ em torno da posição de ajuste. Com essas informações o processo utilização de um atuador IPMC torna-se mais assertivo e produz melhores resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a preparação do aparato experimental e a preparação das amostras, os ensaios foram realizados. Os resultados obtidos juntamente com as discussões, seguiram o fluxograma detalhado na Figura 3.24.

4.1 Índice de acerto do algoritmo

A Figura 4.26, apresenta um detalhamento do índice de acerto do algoritmo durante o ensaio com e sem a marcação na ponta do atuador IPMC.

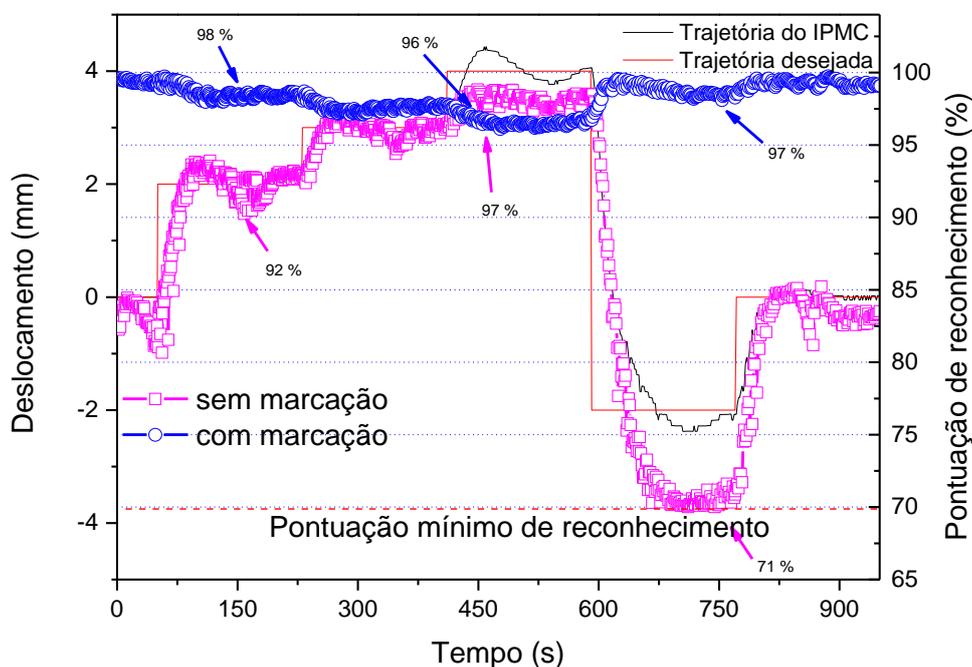


Figura 4.26 - Ensaio para validar uso/não uso da marcação na ponta do IPMC

O gráfico contido na Figura 4.26 apresenta o índice de acerto do algoritmo do sistema com/sem marcação na ponta do IPMC. O eixo secundário foi adicionado com o intuito de apresentar o percentual de reconhecimento durante a realização do ensaio, esse valor expressa o acerto do algoritmo ao encontrar o modelo na imagem de inspeção. O sistema fez uso de um valor mínimo para haver reconhecimento, e esse valor foi definido arbitrariamente em 70%, (700

pontos de 0-1000). Isso significa que se, a semelhança entre o modelo criado e o modelo contido na imagem de inspeção for $\geq 70\%$ o sistema reconhece, caso contrário o sistema perde a referência do modelo e assim, não consegue mais controlá-lo.

Observa-se no gráfico a flutuação da pontuação de reconhecimento enquanto o IPMC está sendo controlado. É nítido que, com a marcação na ponta (azul), a variação do percentual é baixa, apresentando resultado de aproximadamente 98% de acurácia aos 150 segundos, 96% aos 450 segundos e 97% aos 750 segundos de ensaio. Já para o ensaio sem a marcação na ponta do IPMC, observa-se uma alta variação na pontuação com aproximadamente 92% de acurácia aos 150 segundos, 97% aos 450 segundos e 71% aos 750 segundos de ensaio. De fato, entre 680 e 720 segundos a acurácia esteve no limite, isto é, que caso fosse necessário um movimento mais acentuado do atuador, o sistema não conseguiria controlá-lo pela ausência da correspondência do modelo na imagem de inspeção.

Algumas hipóteses podem explicar de forma intuitiva essa variação de percentual de reconhecimento, um giro do IPMC no seu próprio eixo; a posição da câmera em relação à posição do IPMC; a incidência da luz no IPMC, dentre outras. Por fim, com a realização e os resultados desse ensaio, decidiu-se pela utilização da marcação na ponta do IPMC e assim ter um melhor desempenho na etapa de reconhecimento do modelo e consequentemente no controle do IPMC.

4.2 Estudo de Absorção de Água

Como já é sabido, a absorção de água em materiais higroscópicos pode ser usada para a produção de trabalho mecânico [153]. Sabe-se também que os IPMCs apresentam propriedades de deformação complexa, especialmente quando a quantidade de água contida na membrana polimérica muda [154]. Com isso, foi necessário conhecer a quantidade de água absorvida por um IPMC impregnado com diferentes contra-íons (tipos e tamanhos) além de saber por quanto tempo o mesmo fica absorvendo água.

Portanto, o objetivo do ensaio de absorção é avaliar o tempo necessário para cessar a absorção de água observando a variação total de massa do IPMC. E assim, posteriormente realizar os ensaios de controle com maior precisão, garantindo que a amostra estava em equilíbrio osmótico com o meio. Os resultados do ensaio são ilustrados na Figura 4.27 abaixo:

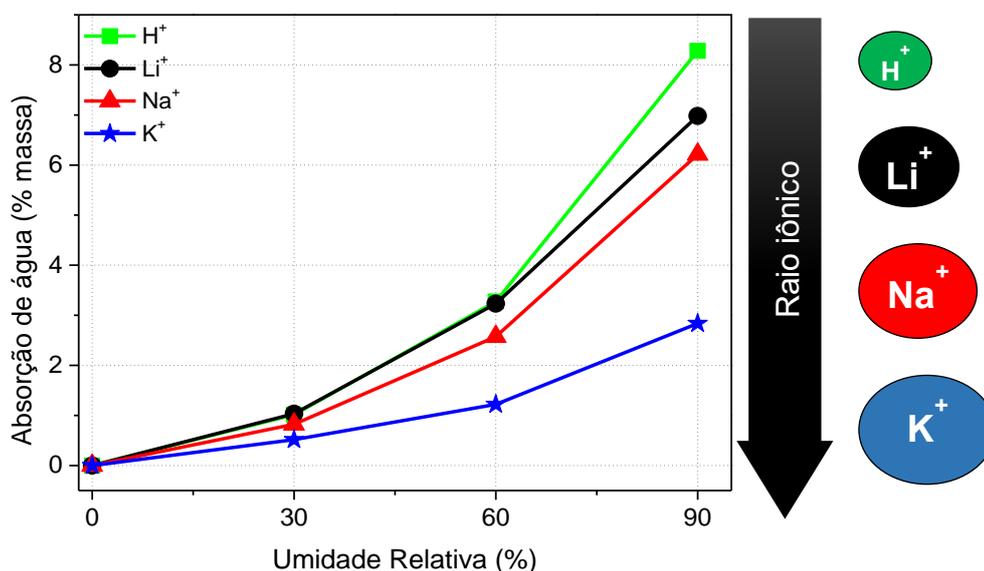


Figura 4.27 – Percentual de aumento de massa pelo IPMC

A Figura 4.27 apresenta os resultados de absorção de água para a amostra de IPMC selecionada em diversas UR até cessar o ganho de massa. O IPMC possui grande capacidade de absorver água. Mesmo com a presença dos eletrodos de platina recobrendo grande parte da área superficial do IPMC, o forte caráter ácido dos grupos SO_3^- presentes no Nafion® atribui essa característica ao IPMC [155].

Além disso, observou-se que com o aumento do raio iônico do contra-íon, a variação percentual de massa foi menor (vide Tabela 4.4) e o tempo para equilíbrio osmótico (tempo no qual a variação percentual de massa é inferior a 5%) foi maior (vide Figura 4.28 – *Ganho de massa em função do tempo*), indicando uma difusão menor e mais lenta de moléculas de H_2O nos canais ionoméricos do material.

A Figura 4.28 apresenta o ganho de massa em função do tempo. A Tabela 4.4 apresenta a relação existente entre o raio iônico do contra-íon e tempo de equilíbrio osmótico para o IPMC condicionado em UR = 30, 60 e 90%.

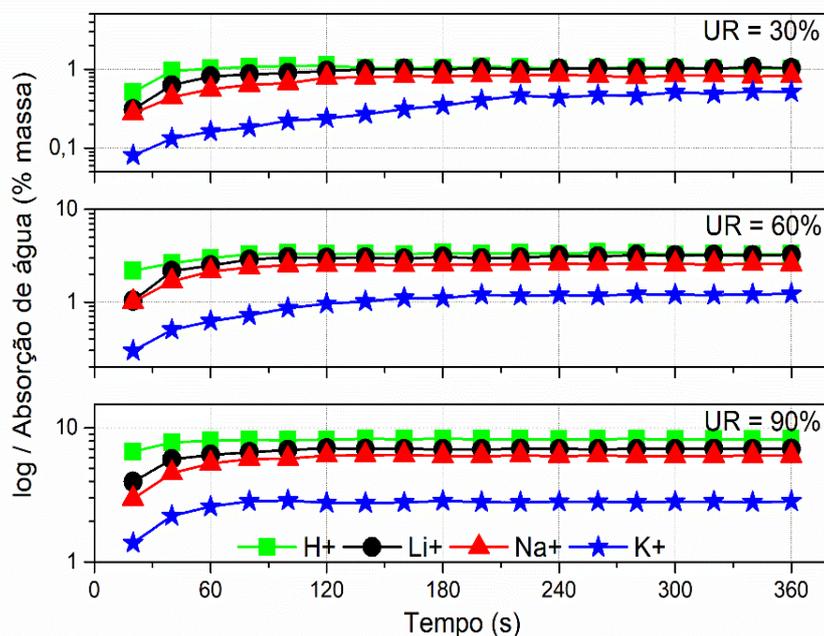


Figura 4.28 – Ganho de massa em função do tempo

Tabela 4.4 - Relação entre raio iônico e tempo para equilíbrio osmótico

Contra-íon	Tamanho (Å)	Tempo para Equilíbrio Osmótico (min)		
		30%	60%	90%
H+	0,38	60	50	30
Li+	0,59	120	100	80
Na+	0,99	150	120	110
K+	1,37	210	190	150

Em suma, observando a figura e a tabela, quanto maior o raio iônico do contra-íon impregnado no IPMC, maior é o tempo necessário para entrar em equilíbrio osmótico com o meio. Além disso, os resultados obtidos comprovam que os contra-íons menores, complexam uma maior quantidade de água, isto é, maior aumento de massa, e, portanto, quanto maior o contra-íon, menor a

quantidade de água que ele irá complexar, conforme estudo detalhado por Zhou et al. em [156] e por Tensel et al. em [157]. Essa informação é primordial para a sequência dos ensaios de controle, haja vista que se deve aguardar o tempo de equilíbrio osmótico do IPMC para a realização dos ensaios.

4.3 Caracterização Morfológica

A Figura 4.31 ilustra a superfície e o mapa químico do IPMC nos três pontos avaliados.

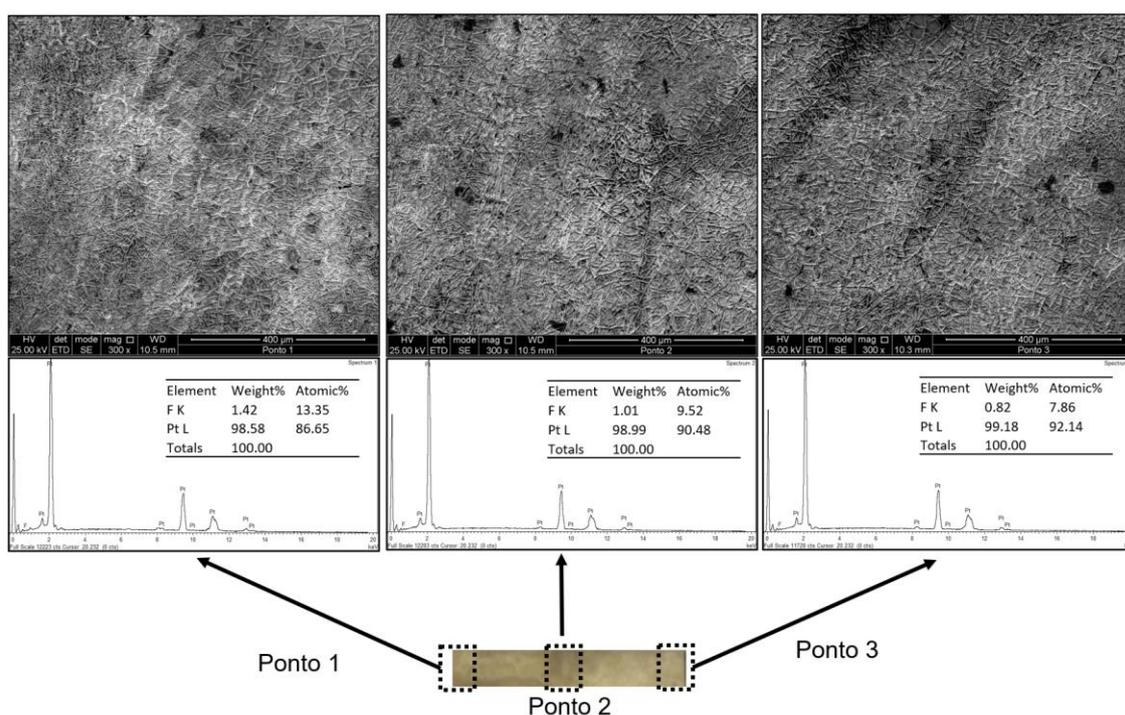


Figura 4.29 - Morfologia superficial e mapa químico da amostra de IPMC produzida.

As imagens superficiais, na escala de 400 μm , ilustram uma boa distribuição de platina por toda superfície do Nafion®, comprovando que o método de deposição química bons IPMCs. Ao mesmo tempo, o mapa químico ilustra regiões com platina e flúor. O flúor, pode ser proveniente da cadeia principal do Nafion®, sendo assim, onde seu peso é maior, significa que há menor quantidade de platina naquele ponto. Portanto, pode-se concluir que no ponto 3, há maior concentração de platina em relação aos pontos 1 e 2. Esse resultado já era esperado, pois como não há controle sobre a de redução da

platina metálica no processo de obtenção do IPMC, variações na camada de platina são comum em IPMC obtidos por meio desse método [158].

A Figura 4.30 ilustra uma visão frontal da superfície da amostra de IPMC.

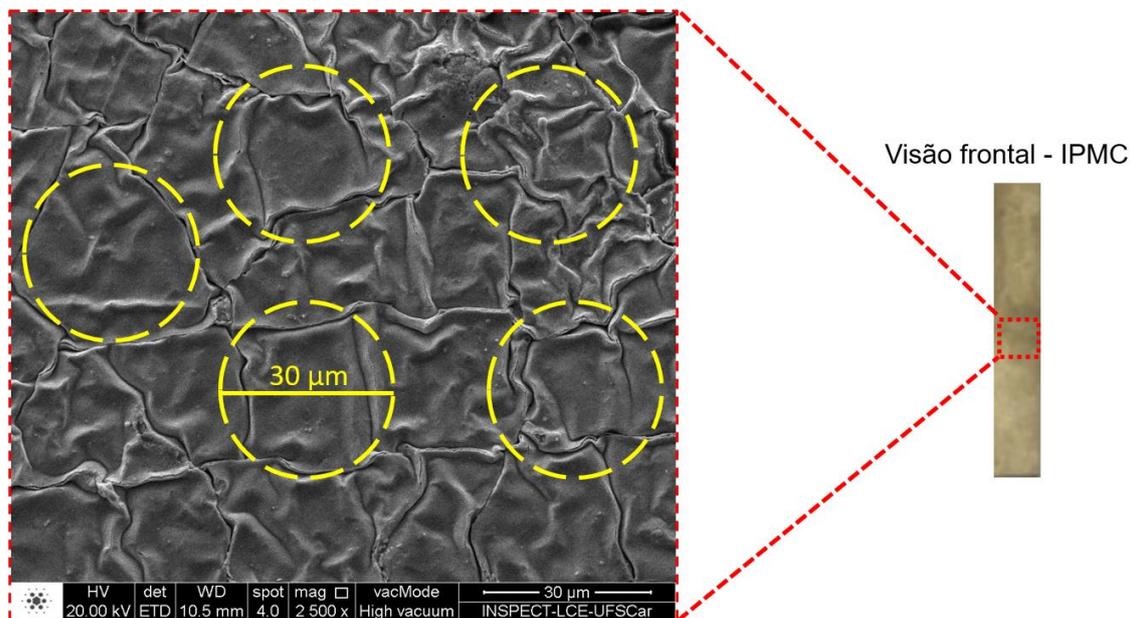


Figura 4.30 – Tamanho médio dos grãos de platina na superfície do IPMC.

Na Figura 4.30 é possível identificar regiões de filme com tamanhos próximos a 30 μm, espalhados uniformemente por toda a superfície, formando “ilhas” de platina. Este fenômeno pode ser derivado do método de deposição envolve a redução de um sal metálico na superfície irregular e composto por diversos canais de dimensões nanométricas [159]. Os íons de platina penetram nos canais ionoméricos que possuem diferentes posições e tamanhos em todo o Nafion®. Durante a fase de redução, o crescimento da platina metálica (Pt⁰) ocorre em diferentes regiões simultaneamente, ou seja, de forma irregular, resultando em uma estrutura segmentada.

A Figura 4.31 ilustra uma visão lateral do IPMC, essa imagem foi obtida por meio da fratura criogênica. Nota-se que houve um recobrimento de Platina bem uniforme além de apresentar uma boa adesão na região da interface. Porém, é importante lembrar que, dependendo do contra-íon, a espessura do IPMC pode variar ligeiramente [160].

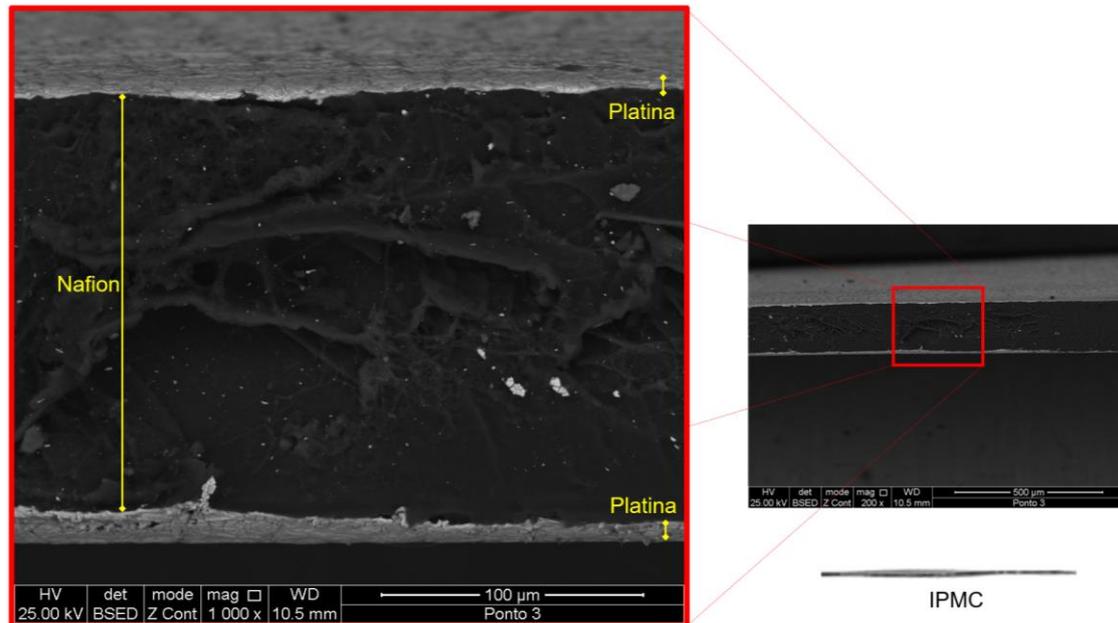


Figura 4.31 – Visão lateral do IPMC.

Contudo, percebe-se que a camada de platina varia de espessura em diferentes pontos do IPMC. Além disso, não foram observadas imperfeições ou delaminação na região interfacial, mostrando que o método de deposição de platina utilizado foi eficaz; garantindo as características eletromecânicas fundamentais para o bom funcionamento do atuador IPMC no sistema de controle desenvolvido neste trabalho.

A Figura 4.32 exibe um detalhamento dos três pontos da amostra realizados em ambos os lados do IPMC. Os valores inseridos de forma vertical são três medidas daquele ponto, enquanto a medida horizontal é a média aritmética simples das três medidas verticais.

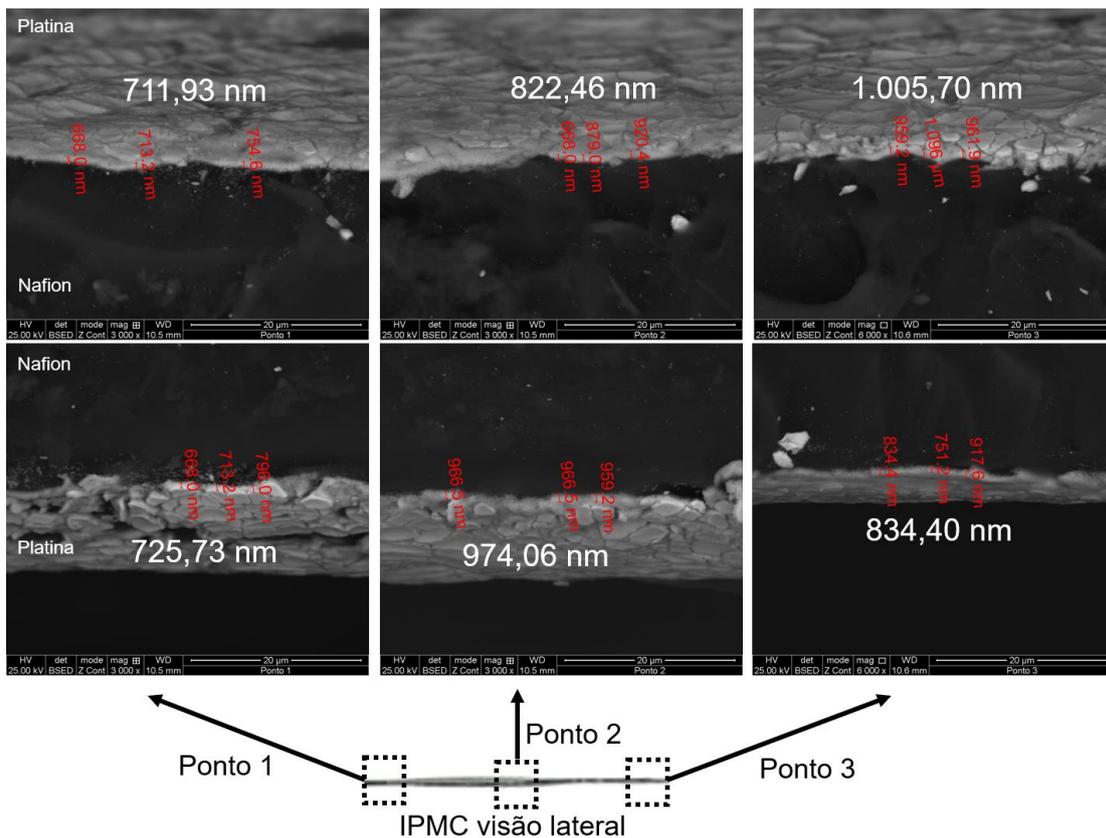


Figura 4.32 – Região de interface polímero/metal em diferentes pontos do IPMC

Nota-se uma variação da camada de platina ao longo da amostra em todos os pontos analisados. No ponto 3, por exemplo, a média em um dos lados foi aproximadamente 20% maior que o outro, isso significa, uma maior concentração de platina em um dos lados. Na prática, essa espessura maior na platina, pode aumentar sensivelmente o módulo de Young do material e também aumentar a resistência elétrica do material quanto à passagem dos elétrons. No ponto 2 e 1, a diferença entre as camadas de platina foi de aproximadamente 18% e 2%, respectivamente.

A Figura 4.33 ilustra uma representação esquemática de quais foram os pontos avaliados no MEV.

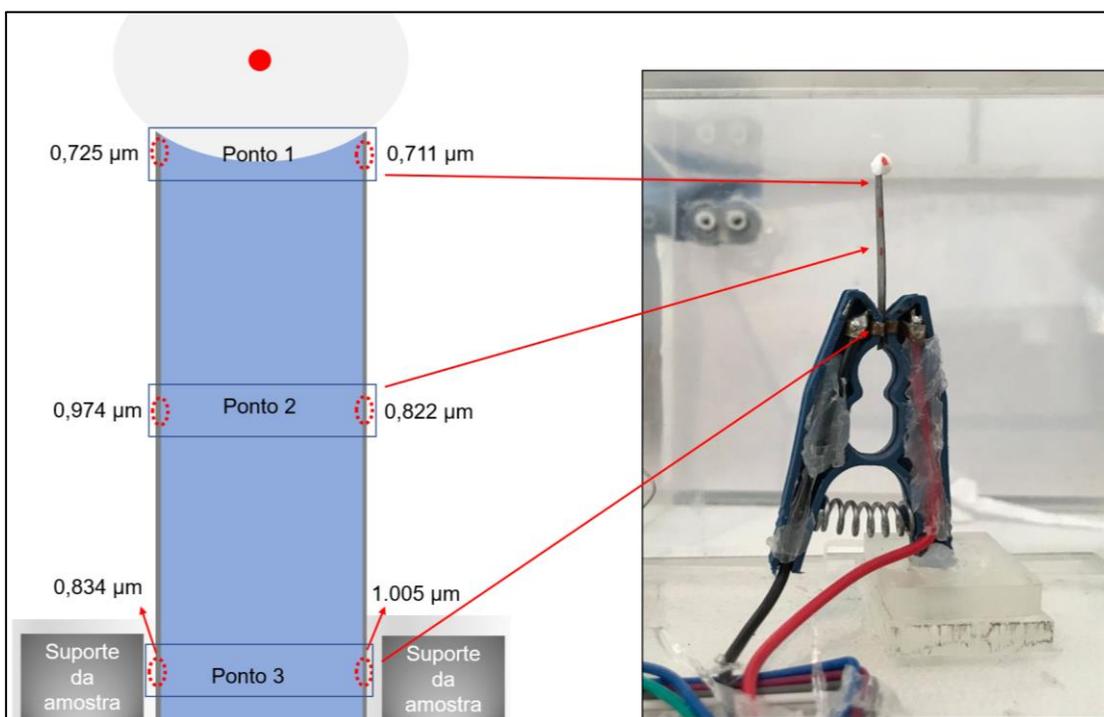


Figura 4.33 - Representação esquemática e imagem real dos pontos avaliados no MEV.

É possível observar uma não uniformidade entre os eletrodos e ao longo de cada um deles. No Ponto 3, por exemplo, local onde a amostra foi fixada e o estímulo elétrico aplicado foi onde a maior variação foi observada. Sendo assim, a espessura da camada de platina faz uma importante diferença para propagação dos elétrons através do eletrodo. Percebe-se no eletrodo da direita da imagem uma camada 20% maior de platina do que a da esquerda, e isso, conforme já mencionado anteriormente, é um forte indício de que o atuador IPMC terá maior facilidade de se mover para a direita do que para a esquerda sob ação de controle. Já que a camada mais espessa de platina aumenta a resistência elétrica do material e conseqüentemente dificulta a passagem de corrente através do eletrodo.

Além disso, outro fator determinante para o bom funcionamento do IPMC, é a integridade da platina metálica na superfície do eletrodo, e isso, com o passar do tempo de atuação pode resultar em regiões com maior número de microfaturas devido ao esforço cíclico contínuo. Essas microfaturas tendem a ser menores do que as ilustradas na Figura 4.30 – *Tamanho médio dos grãos de*

platina na superfície do IPMC. isto porque, no processo de deformações cíclicas, esforços cíclicos são submetidos nas interfaces e essas tensões internas de cisalhamento causam as microfaturas e assim favorecendo a evaporação do solvente. Esses resultados são ilustrados na Figura 4.31 e foram confirmados em estudo realizado anteriormente pelo grupo de pesquisa em ensaio cíclico [52].

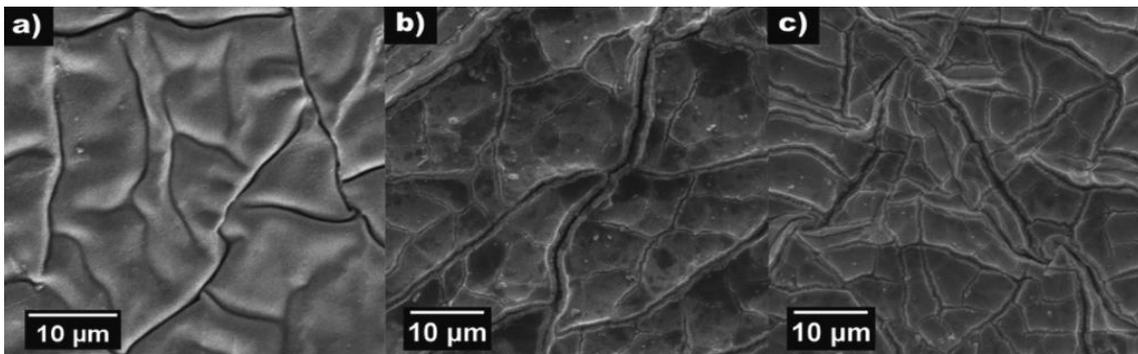


Figura 4.34 - **a)** IPMC antes da atuação; **b)** IPMC-H depois de 18h de atuação; **c)** IPMC-Li depois de 18h de atuação [52]

Com esses resultados é possível prever que o atuador IPMC, sob ação de controle, terá movimentos mais rápidos para uma das direções em relação a outra, já que possui uma camada de platina menos espessa, e além disso, espera-se que com o tempo de atuação, o IPMC perca desempenho, devido à evaporação do solvente, exigindo uma tensão maior por parte do controlador para manter a trajetória desejada.

4.4 Caracterização Elétrica

Após o método de preparação, o IPMC foi cortado em cinco amostras menores de tamanhos semelhantes, conforme ilustrado na Figura 4.35, possibilitando a utilização de diferentes partes para a realização dos ensaios e caracterizações. Porém, mesmo sendo amostras oriundas da mesma preparação, não foi possível garantir que todas tivessem as mesmas propriedades elétricas.

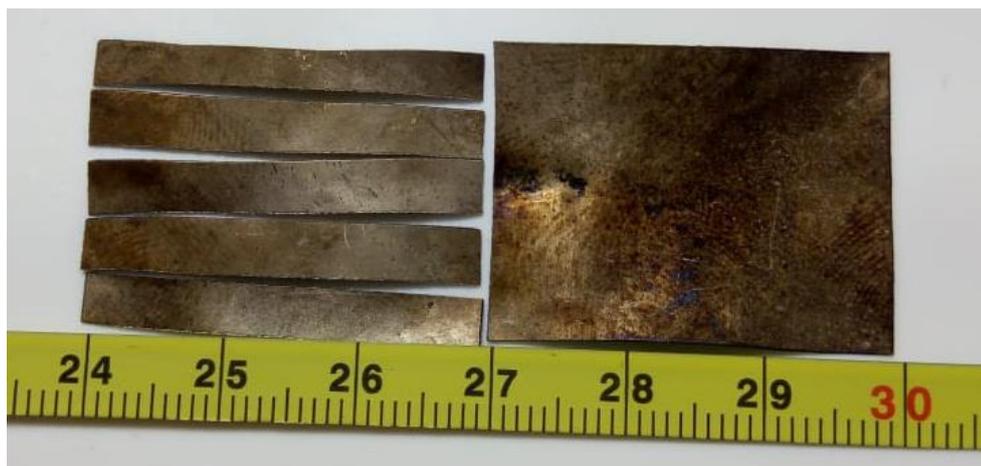


Figura 4.35 - IPMCs obtidos ao final da etapa de preparação com dimensões de aproximadamente 30mm x 3mm.

4.4.1 Método quatro pontas

A amostra de IPMC utilizada durante todos os ensaios foi isolada em uma das faces e as sondas de pressão do equipamento foram fixados nas extremidades da mesma para a realização do ensaio. Em seguida, esse procedimento foi realizado na outra face, conforme ilustrado na Figura 4.36.

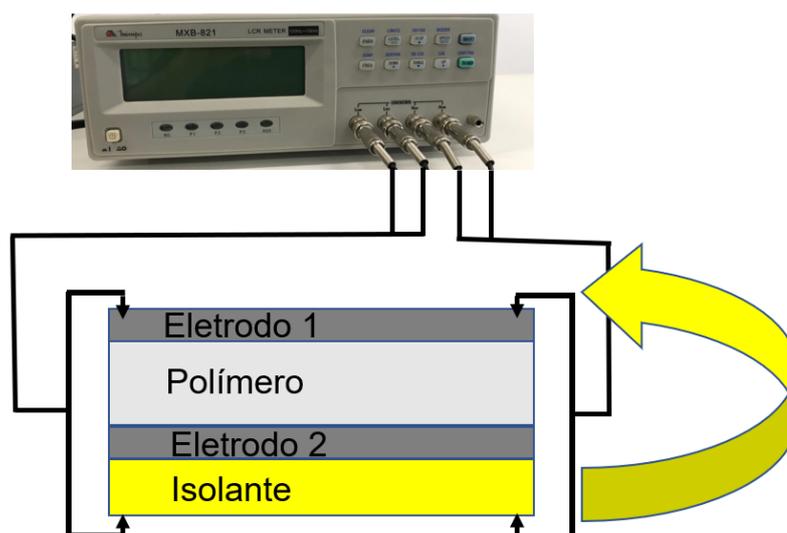


Figura 4.36 - Representação do ensaio quatro pontas.

A Tabela 4.5 apresenta o resultado dos dados coletados durante o ensaio 4 pontas.

Tabela 4.5 - Resultado do ensaio de quatro pontas.

Medida	Eletrodo 1	Eletrodo 2
Resistência (Ω)	147,23 \pm 1,36	98,34 \pm 1,13
Indutância (μH)	3,15 \pm 0,07	1,34 \pm 0,02
Capacitância (μF)	79,76 \pm 0,74	199,3 \pm 1,44

Após a realização do ensaio, os dados obtidos foram a resistência, indutância e capacitância dos eletrodos. Para a resistência, os dados obtidos revelaram que em uma das faces (Eletrodo 1), o valor foi aproximadamente 50% maior em relação à outra (Eletrodo 2). Na prática, o sistema de controle terá de fornecer mais energia em um dos eletrodos para a ponta do atuador IPMC percorrer as mesmas distâncias. Essa resistência maior em uma das faces pode ser explicada por uma distribuição desigual de platina no processo de formação do eletrodo, já comprovada no MEV na seção anterior, já que não há um controle sobre a quantidade depositada em cada uma das faces. Além disso, deve ser considerado uma maior resistência mecânica, isto é, módulo elástico maior, já que em uma das faces a espessura maior do eletrodo dificultará a flexão do eletrodo no mesmo sentido.

Os resultados de indutância e de capacitância corroboram o resultado da resistência. Na indutância do Eletrodo 1 foi mais que duas vezes a indutância medida no Eletrodo 2, isso significa que há uma tendência maior à oposição da passagem de corrente elétrica no Eletrodo 1. Na prática haverá maior consumo de corrente elétrica pelo Eletrodo 1 do que no Eletrodo 2 para deslocar em distâncias equivalentes. Já na capacitância que é a grandeza escalar responsável por mensurar a capacidade de armazenamento de energia, o Eletrodo 1 apresentou resultado de aproximadamente 2,5 vezes menor que o Eletrodo 2. As evidências somadas comprovam que, na etapa de controle, a tensão necessária fornecida pelo sistema de controle para mover o IPMC em uma das direções será superior à outra.

4.4.2 Espectroscopia de Impedância (EIS)

Uma forma completa de caracterizar as propriedades elétricas do material é por meio da espectroscopia de impedância. A finalidade desse ensaio é avaliar os processos elétricos e eletroquímicos de migração iônica que ocorrem no interior do IPMC. Analisar esses processos em situações de mudança de contração e de UR é fundamental para o entendimento da movimentação do mesmo. Portanto, os resultados de impedância podem ser analisados de duas formas. A primeira pelo gráfico de Nyquist, relacionando a parcela imaginária da impedância com a parcela real. E a segunda, por meio do gráfico de Bode, relacionando a parte real da impedância e o ângulo de fase com a frequência em escala logarítmica.

4.4.2.1 Gráfico de Nyquist

Os ensaios foram realizados para os quatro contra-íons: Li^+ , H^+ , K^+ e Na^+ em UR = 30, 60 e 90%. O gráfico de Nyquist abaixo apresenta os resultados do ensaio em UR = 90%.

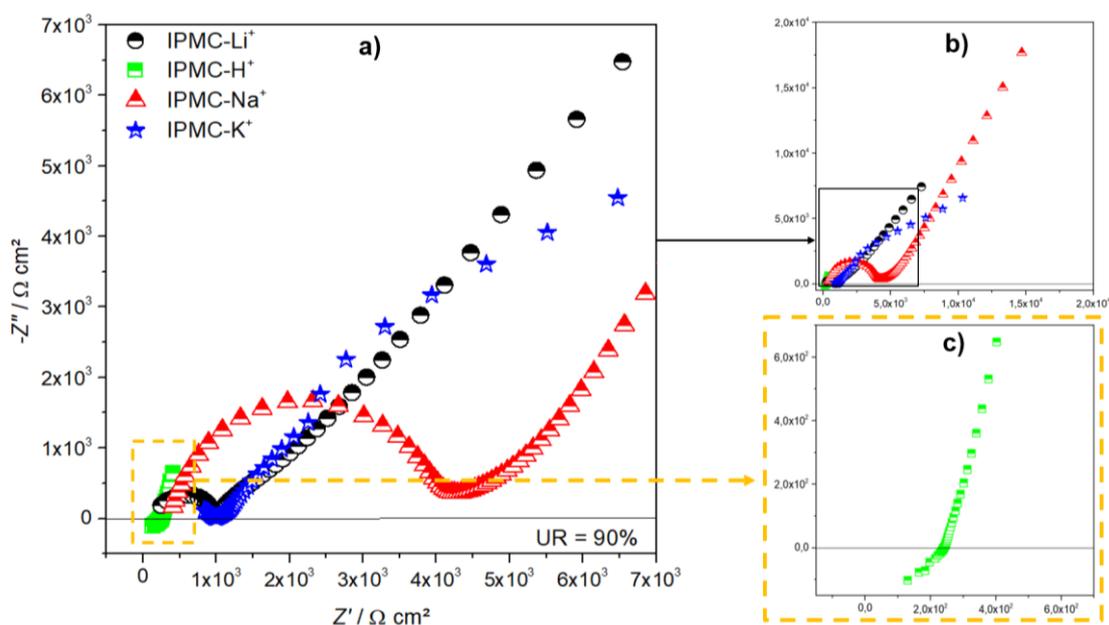


Figura 4.37 - Gráficos de Nyquist, **a)** Região de alta e média frequência, **b)** região de difusão (baixa frequência), **c)** detalhes da resposta indutiva do IPMC- H^+ . em UR = 90%.

A Figura 4.37.a de Nyquist ilustra a resposta semicircular, típica de sistemas resistivos-capacitivos. Já na Figura 4.37.b apresenta o Nyquist em escala maior mostrando a região de difusão.

Pode-se observar na Figura 4.37.c que os comportamentos dos contra-íons são distintos, em especial, o íon H^+ em relação aos demais. Como já mencionado, os mecanismos de transporte do contra-íon através da membrana do Nafion®, podem ocorrer principalmente em dois tipos [24]: mecanismo de transporte estrutural, ou Grotthuss, mecanismo de transporte veicular, conforme ilustrado na Figura 4.38.

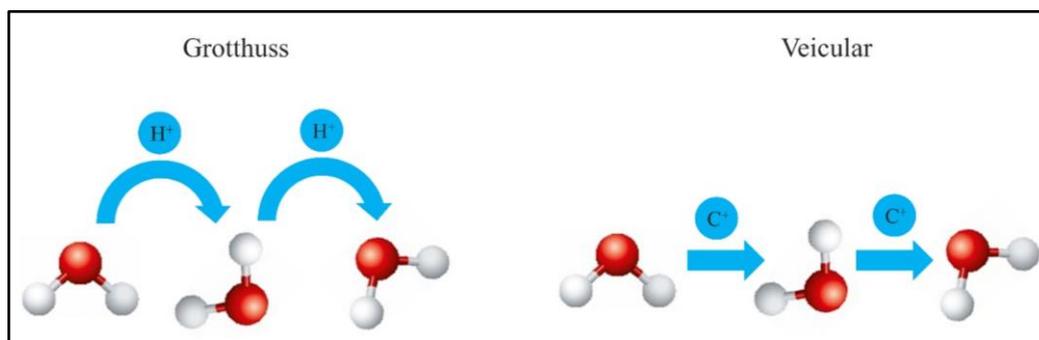


Figura 4.38 - Mecanismo de transporte estrutural (Grotthuss) e veicular

Grotthuss, refere-se a alta mobilidade do próton (H^+) nas moléculas de água fazendo com que o mesmo salte entre elas. Embora o H^+ possa se difundir também no mecanismo veicular, a maioria dos cátions solvatados tenderá a seguir somente o mecanismo de difusão veicular devido ao movimento conjunto de sua carga e centro de massa [161], [162] sendo assim, a difusão veicular ocorre mais lentamente. Com isso, pode-se assumir que ao controlar o IPMC-H haverá um transporte rápido de prótons e, conseqüentemente, uma rápida resposta do atuador ao estímulo elétrico aplicado em relação aos demais contra-íons.

Para os contra-íons da família dos metais-alkalinos, todos apresentam comportamentos similares. Assim, pode-se representar o intervalo no eixo Z' , para início do semicírculo (zona de altas e médias frequências), como a resistência do eletrodo do IPMC, isto significa, quanto maior o “deslocamento” em Z' para início do semicírculo, maior será a resistência do eletrodo. Pelos

resultados obtidos, é possível estimar esses valores a parcela da resistência do eletrodo em 250, 400 e 750 Ω , para o IPMC-Li, IPMC-Na e IPMC-K respectivamente.

Com relação ao semicírculo (resistência e capacitância do dispositivo) representada por frequências mais baixas, há ocorrência de capacitância (reações não-faradaicas na superfície do eletrodo) atribuídos ao transporte de massa. Os resultados apresentaram uma intensidade para o contra-íon Na⁺ com grande intervalo de resistências (400 a 4000 Ω), K⁺ com um pequeno intervalo (750 a 1100 Ω) e para o Li⁺ em intervalo de 250 a 900 Ω . Contabilizando estes valores, a resistência total (resistência do dispositivo) dos compósitos segue essa ordem: IPMC-Na > IPMC-K > IPMC-Li > IPMC-H. Isso significa, que a velocidade de migração do contra-íon obedece a seguinte ordem IPMC-H > IPMC-Li > IPMC-K > IPMC-Na. Além disso, é possível identificar a capacitância da dupla camada elétrica no ápice do semicírculo. Esta, é originada pela separação das cargas na interface entre eletrólito (água + contra-íons) presente no interior dos canais ionoméricos e eletrodo.

Na Figura 4.37.**b**, é possível identificar o grau de difusão iônica no interior da membrana polimérica, caso a inclinação da curva for baixa, maior difusão, e vice-versa. Assim, os resultados apresentaram uma alta difusão iônica seguindo essa ordem IPMC-H > IPMC-Na > IPMC-Li > IPMC-K. Ao final, pode-se concluir que o movimento do IPMC resultante do estimulado elétrico em ambiente com alta UR, é influenciado de maneira distinta para cada contra-íon. Esses resultados são importantes, pois têm relação direta com a resposta produzida pelo IPMC na ação do controle, e assim será possível correlacionar o movimento para com os mecanismos de migração. A expectativa é que em alta UR, o sistema de controle consiga controlar com facilidade o IPMC independente do contra-íon utilizado, já que essa condição ambiental é favorável à movimentação do mesmo.

Abaixo estão os resultados dos ensaios realizados em UR = 60%.

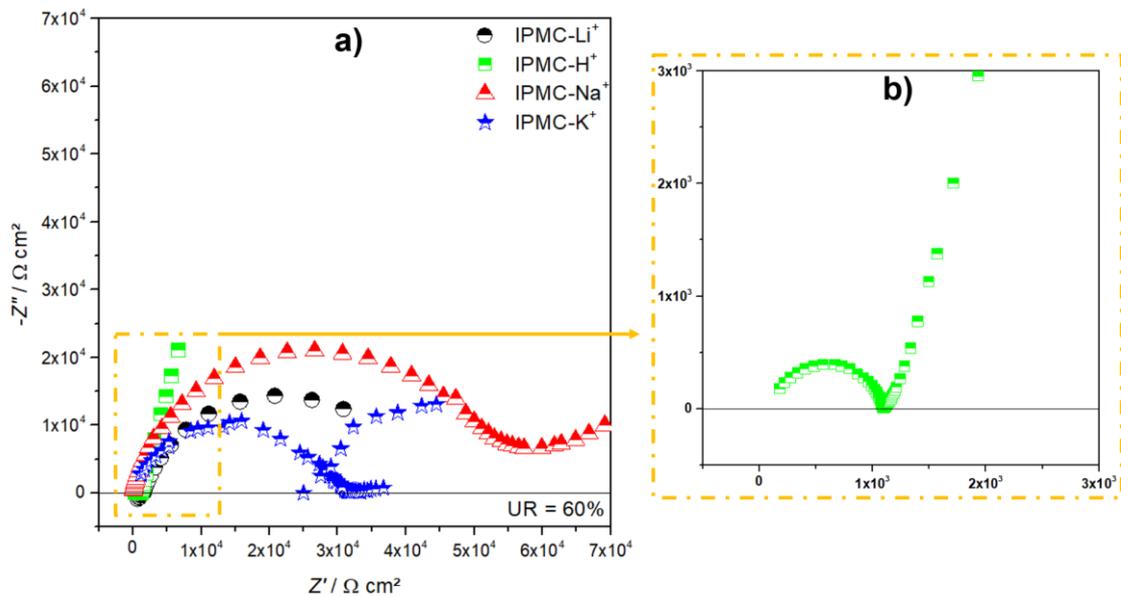


Figura 4.39 - Graficos de Nyquist, **a)** Região de alta e média frequência, **b)** detalhes da resposta do IPMC-H⁺ em UR = 60%.

A Figura 4.39.a ilustra a resistência do eletrodo e a resposta semicircular, representando a combinação da parcela capacitiva e resistiva do dispositivo.

A resposta obtida do IPMC-Na, IPMC-Li e IPMC-K apresentaram pequena parcela referente à resistência do eletrodo na zona de médias e altas frequências, com os valores estimados em 68, 79 e 1170 Ω , respectivamente. Já a resistência do dispositivo é bem evidente na formação do semicírculo para os três contra-íons com destaque para o IPMC-Na, onde é mais proeminente. A parcela resistiva da camada de difusão não foi observada no IPMC-Li, no IPMC-H foi observada em uma frequência mais altas que a observada no IPMC-Na e no IPMC-K. Portanto, a formação da dupla camada elétrica e o mecanismo de difusividade iônica mais proeminente foi observada na seguinte ordem IPMC-H > IPMC-Li > IPMC-K > IPMC-Na.

Já a Figura 4.39.b ilustra em detalhes o comportamento predominantemente indutivo do IPMC-H. No ensaio anterior, o IPMC-H também apresentou esse comportamento. Contudo, neste ensaio com UR = 60%, apresentou uma parcela resistiva e capacitiva bem delineada.

Com a análise desses resultados há uma expectativa que o sistema de controle consiga realizar o controle de todos os IPMCs nessa UR. Porém,

quando dopados com íons mais capacitivos, como é o caso do H^+ e Li^+ o fará com maior facilidade, fornecendo uma menor tensão para manter a trajetória. Por outro lado, para íons menos capacitivos, como é o caso do Na^+ e K^+ , será necessário fornecer uma maior tensão.

A Figura 4.40 abaixo ilustra o diagrama de Nyquist para os resultados obtidos com diferentes contra-íons em UR = 30%

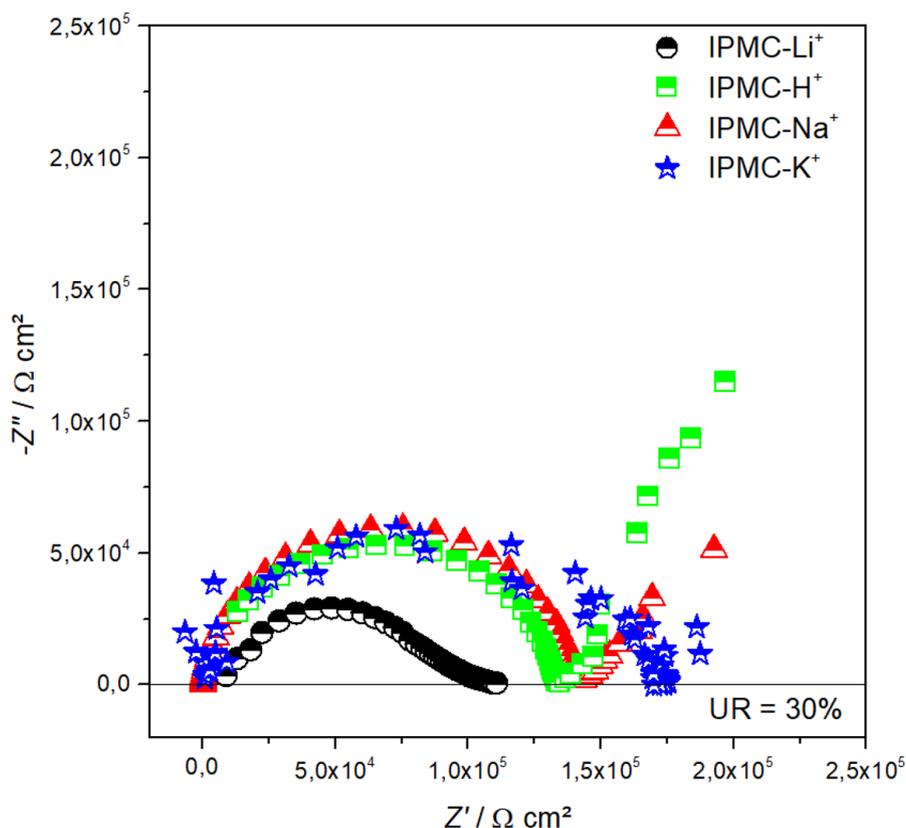


Figura 4.40 - Graficos de Nyquist em UR = 30%

O gráfico da Figura 4.40 exibe o comportamento dos contra-íons em baixa UR. O semicírculo é visto de forma bem delineada em todas as análises, o que pode ser relacionado com a rapidez da migração no interior da membrana. Uma vez que não há tanta água disponível nos canais ionoméricos, os íons H^+ (na forma de H_3O^+) tenderam a sofrer o mesmo tipo de transporte que os demais íons, fazendo com que seu transporte ocorre significativamente mais lento.

Assim, conclui-se que todos os contra-íons alcalinos avaliados sofrem pela ausência de moléculas de água no interior da membrana. Além disso, os

íons maiores, caso do K^+ e Na^+ , sofrem mais com o efeito do diâmetro dos canais tendendo a serem mais lentos na etapa de migração.

Sobre o comportamento do IPMC-H, com as evidências obtidas nas diferentes UR's, conclui-se que, ao diminuir a umidade da matriz polimérica, os canais ionoméricos tendem a reduzir seu diâmetro, e isso resulta em um comportamento similar aos demais contra-íons alcalinos, difundindo-se majoritariamente pelo mecanismo veicular e minoritariamente pelo mecanismo de Grotthuss.

4.4.2.2 Gráfico de Bode

O gráfico de Bode, exibido na Figura 4.41, representa o módulo da impedância e o ângulo de fase em função do logaritmo da frequência. Abaixo estão os resultados dos ensaios para os diversos contra-íons em UR = 90/60/30%.

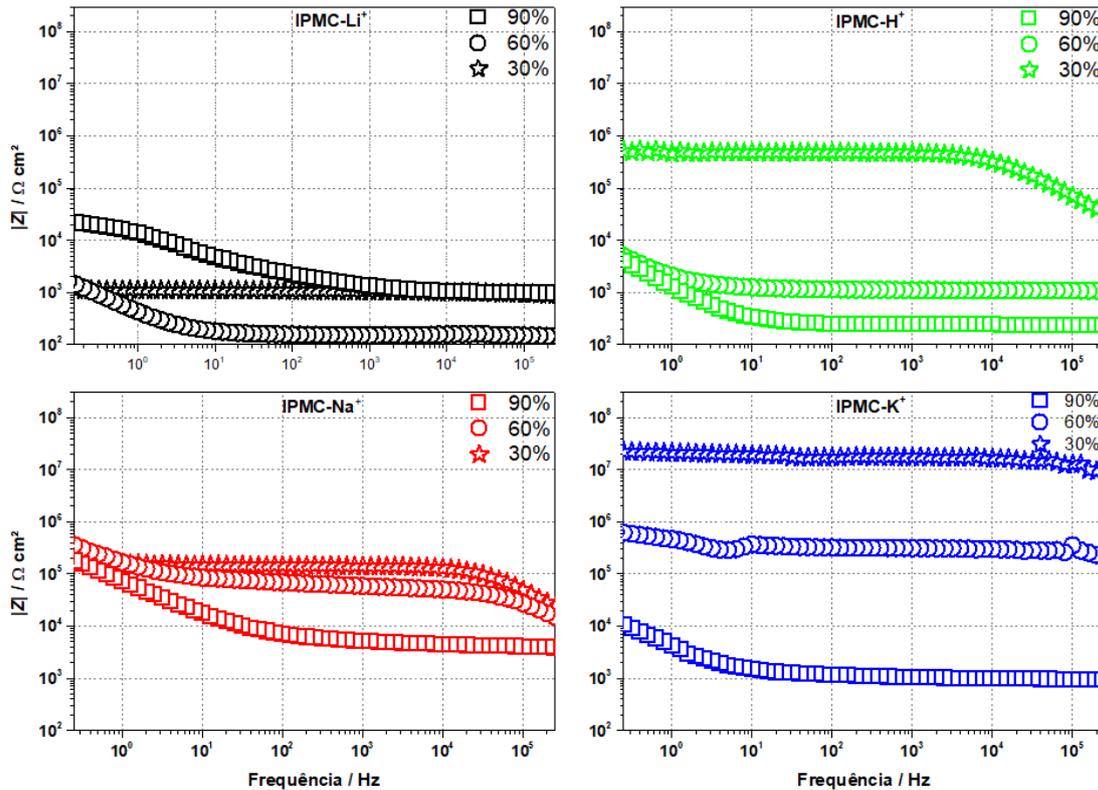


Figura 4.41 - Gráfico de Bode - Módulo da impedância em função da frequência para todos os contra-íons em diferentes UR's.

Em UR = 90%, todos os contra-íons analisados apresentaram comportamento capacitivo em baixas frequências e comportamentos resistivos em altas frequências. Isto significa, uma maior facilidade para migração de íons operando em baixas frequências e conseqüentemente mais rapidez do movimento do IPMC ao ser controlado. E na contramão, uma maior dificuldade de difusão de íons em médias/altas frequências minimizando o movimento do IPMC.

Além disso, os valores dos módulos da impedância em baixa frequência (10^{-1}) e na alta frequência (10^6), segue ordem IPMC-Na > IPMC-Li > IPMC-K > IPMC-H. Ao avaliar a relação da capacitância inicial para a resistência final, chega-se a seguinte ordem IPMC-Na < IPMC-H < IPMC-Li < IPMC-K. Isso indica que, em ambientes mais úmidos, o IPMC-Na terá maior facilidade de movimentação. Em contrapartida, o IPMC-K terá maior dificuldade de movimentação, causada pela menor mobilidade iônica do K^+ no interior da membrana.

Em umidade intermediária, no caso do ensaio em 60%, o IPMC-H e o IPMC-Na apresentaram comportamento similar em baixa frequência (10^{-1}), ambos apresentaram resistência quase idênticas ao ensaio anterior, sugerindo que o comportamento do IPMC, resultado da migração iônica não sofrerá alteração significativa.

O Li^+ , como nos demais íons avaliados, percebe-se que o módulo da impedância diminui com a redução da UR, tanto para baixas, quanto para médias e altas frequências, contudo, apresenta uma curva capacitiva mais curta em relação ao ensaio realizado com UR = 90%, de 0,1 até 10 Hz o que já era esperado, tendo em vista que ao reduzir a UR, haverá menor mobilidade iônica. O resultado do K^+ apresentou um aumento no módulo da impedância, isto é, diminuindo a UR, aumentou a resistência substancialmente.

Por fim, entre o módulo de baixa e alta frequência os contra-íons apresentaram uma relação da capacitância inicial para a resistência final, na seguinte ordem $Na^+ < Li^+ < H^+ < K^+$. E uma constatação bastante clara para todos os contra-íons, foi que com a diminuição da UR, a parcela capacitiva também foi

diminuída nas baixas frequências, o que já era esperado e com o aumento da frequência, a parcela resistiva foi predominante.

Nas curvas de módulo de impedância com UR = 30%, é possível observar um comportamento similar entre o IPMC-Li e IPMC-Na em baixas frequências (10^{-1}). Em ambos, ao reduzir a UR, o módulo da impedância também é reduzido, porém, ao contrário dos ensaios anteriores, nesse ambiente mais seco, o comportamento capacitivo mesmo em baixas frequências é mínimo, o que pode ser traduzido como uma grande dificuldade de migração iônica através do polímero, haja vista que não há uma separação efetiva de cargas no interior do mesmo. Já para o caso do IPMC-H e IPMC-K houve um aumento significativo no módulo da impedância em baixas frequências, um comportamento contrário do que era esperado. Além disso, a relação capacitiva em baixa frequência *versus* resistiva em alta frequência foi mínima, o que mostra a dificuldade de mobilidade dos íons no interior do Nafion® e assim, posteriormente, uma maior dificuldade de controle do IPMC em condições mais secas.

Conforme a frequência aumenta, o ângulo de fase tende a zero pois a capacitância diminui drasticamente, tendendo a zero e podendo até ser desprezada. Na contramão, nas altas frequências a parcela resistiva tende a prevalecer e a corrente vai estar em fase com a tensão [163].

A Figura 4.42 ilustra os gráficos de ângulo de fase na resposta da frequência para vários contra-íons em UR = 90/60/30%.

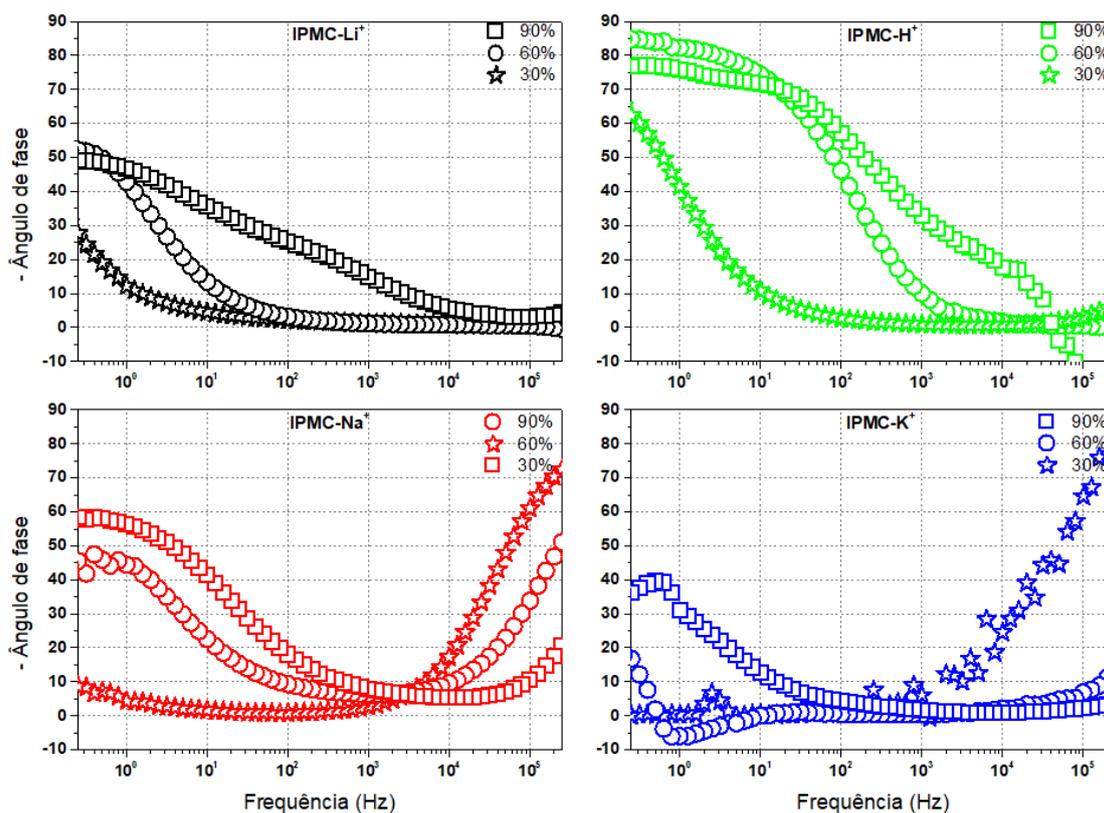


Figura 4.42 - Gráfico de Bode - Ângulo de fase em função da frequência para todos os contra-íons em diferentes UR's.

Com os resultados em UR = 90%, foi possível identificar que os contra-íons possuem características distintas. O H⁺, por exemplo, apresentou característica capacitiva mais prolongada (ângulo de fase defasado em aproximadamente 77°), já o que apresentou a menor foi o K⁺ (ângulo de fase defasado em aproximadamente 37°). Além disso, o fato de o hidrogênio possuir menor raio iônico em relação demais, também influencia, facilitando o deslocamento no interior dos canais ionoméricos. E para o potássio, indica que a maior dificuldade em atravessar a membrana polimérica é em função de raio iônico ser superior aos demais. A ordem do atraso do ângulo de fase na parte difusional (zona da baixa frequência) foi: IPMC-H > IPMC-Na > IPMC-Li > IPMC-K. Já para a zona das altas frequências todos os comportamentos são similares e tendem a zero, caracterizando um sistema predominantemente resistivo. A ordem dos contra-íons tendendo à um sistema resistivo foi: K⁺ > Na⁺ > Li⁺ > H⁺,

sinalizando que o raio iônico seja predominante na parcela resistiva, já que a ordem dos contra-íons foi do maior para o menor raio.

Com UR = 60%, os resultados foram similares, no entanto, IPMC-H e IPMC-Li apresentaram ângulo de fase mais pronunciado que no ensaio com UR = 90%, no caso do IPMC-H o ângulo estava defasado em aproximadamente 85° e o IPMC-Li a defasagem foi de aproximadamente 54°. Esses resultados indicam que esses dois contra-íons não irão apresentar mobilidade iônica reduzida na zona da baixa frequência em relação à UR = 90%.

No caso do IPMC-Na e IPMC-K, é possível observar que o ângulo de fase foi menor e essa constatação explica que ambos irão ter mais dificuldade na difusão dos íons através da membrana polimérica. Além disso, o IPMC-K apresentou uma zona crítica nessa umidade, que foi a redução drástica do ângulo de fase e conseqüentemente da parcela capacitiva (ângulo inferior a 20°) em relação aos demais. Na prática, será difícil controlar o potássio em umidades relativas intermediárias já que a mobilidade iônica estará comprometida. A ordem de queda de ângulo de fase na zona da baixa frequência foi IPMC-K > IPMC-Na > IPMC-Li > IPMC-H. Conforme a frequência vai aumentando os IPMC-K > IPMC-Li > IPMC-Na > IPMC-H se tornarão mais resistivos e, portanto, a difusão será reduzida.

Em ambientes com UR baixa (30%), há uma significativa mudança no ângulo de fase para todos os contra-íons. Em suma, com essa redução, o sistema se torna menos capacitivo, e conseqüentemente, reduz a difusão. Os contra-íons que mais apresentaram redução na parcela capacitiva foram $K^+ > Na^+ > Li^+ > Na^+$.

Com esses resultados, é possível concluir que em altas umidades, todos os contra-íons terão similaridade e poderão ser controlados, uns mais rapidamente que outros, conforme o raio iônico e o método de difusão do íon através da membrana polimérica. Ao passo que a umidade for sendo reduzida, a expectativa é que a taxa de deslocamento do atuador tenda a reduzir e o sistema de controle tenha maior dificuldade de estabilizar o IPMC na posição desejada. Pelos resultados aqui analisados, é possível evidenciar que os contra-íons que irão sofrer menos com a redução da UR serão IPMC-H e IPMC-Li. Além

disso, provavelmente os IPMCs mais capacitivos exigirão menos tensão fornecida pelo sistema de controle para ajustar e manter trajetória, já que respondem mais rapidamente a ela. Em contrapartida os IPMCs mais resistivos provavelmente apresentarão respostas mais lentas e exigirão maior tensão para ajustar e manter a posição desejada.

4.4.3 Cronoamperometria

A cronoamperometria multi-etapas foi realizada para avaliar os picos de corrente em DDP máxima (2 volts) e a carga acumulada das amostras de IPMC. A faixa de polarização aplicada foi de 0,5 a 2,0 volts com uma descarga entre cada 0,5 volts de incremento de polarização; todas essas medições foram realizadas por um período de 60 segundos para que fosse possível observar a carga/descarga das amostras de contra-íons do IPMC em todas as faixas de polarização.

Além disso, ensaios foram realizados em triplicata variando as UR's em 30, 60 e 90%, com intuito de avaliar a influência da UR no comportamento da carga elétrica acumulada dada pela integral da curva de corrente no tempo.

O gráfico da Figura 4.43 abaixo apresenta o ensaio realizado em UR = 30%.

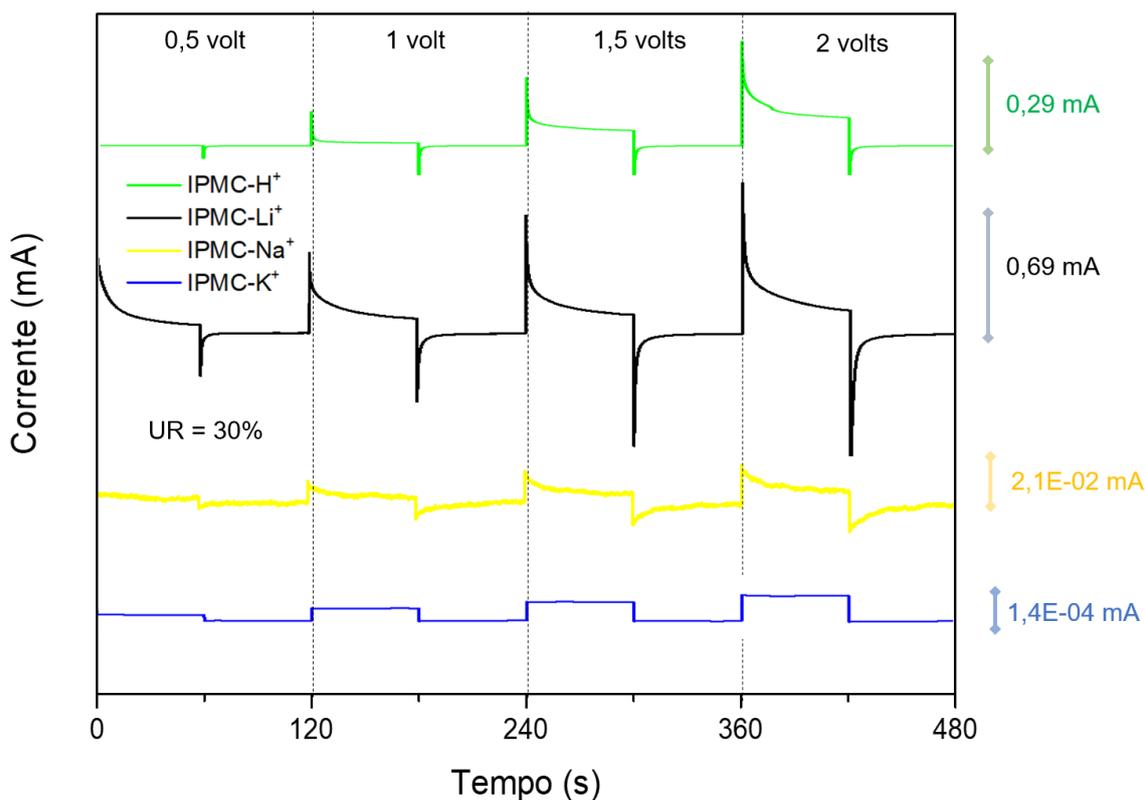


Figura 4.43 - Cronoamperometria em UR = 30%

A Tabela 4.6 abaixo, apresenta os dados coletados durante o ensaio realizado em UR = 90%

Tabela 4.6 - Resultado do ensaio de Cronoamperometria em UR = 30%

UR = 30%	Picos de corrente (mA)	Carga acumulada (C)
IPMC-H	0,29	256,85
IPMC-Li	0,69	73,71
IPMC-Na	0,021	254,57
IPMC-K	0,00014	0,0049

No gráfico da Figura 4.43 observa-se a resposta da corrente elétrica do IPMC em função da DDP aplicada. O perfil de resposta da curva de resposta do IPMC-H apresenta o maior pico de corrente elétrica, de 0,29 mA, quando estimulado em 2 volts, o que já era esperado. A carga acumulada para a curva de IPMC-H em UR=30% foi de 256,85 Coulomb.

O resultado do IPMC-Li apresentou o maior pico de corrente ao ser estimulado em 2 volts com um valor de 0,69 mA, aproximadamente 2,5x maior que o pico máximo do IPMC-H. Aparentemente não foi observado um comportamento anômalo na curva do IPMC-Li; ao final do ensaio a carga acumulada foi de 73,71 Coulomb.

A curva do ensaio do IPMC-Na apresentou um comportamento com picos menos significativos de corrente representando que, mesmo nos picos de DDP, houve uma menor mobilidade dos transportadores de carga iônica no interior do material. Atingindo o pico máximo de corrente de 0,021 mA em resposta ao estímulo elétrico de 2 volts; apresentando carga acumulada de 254,57 Coulomb.

E por fim, a curva resultante do IPMC-K foi a que apresentou o comportamento mais distinto em relação aos demais. A curva de corrente que deveria representar a carga/descarga similar a um capacitor, devido as características do IPMC, nesse caso, apresentou uma resposta de corrente quase como um degrau. Essa evidência retrata que houve baixo carregamento e que o mesmo não foi reduzido exponencialmente com o tempo.

Isso indica que o K^+ , por se tratar de um contra-íon de maior raio iônico, possui dificuldades nítidas de atravessar a membrana polimérica pelos canais ionoméricos de diâmetros reduzidos (baixa UR) e após atravessar, apresenta grande dificuldade de retornar pois a baixa UR reduz também a camada de solvatação do contra-íon. E como resultado do ensaio, apresentou pico máximo de corrente com valor de 0,00014 mA e carga acumulada de 0,0049 Coulomb.

Como será visto mais adiante, este comportamento de carregamento e descarregamento com o tempo poderá, muito provavelmente, impactar na performance de controle do IPMC aumentando assim, os tempos para alcançar a e ajustar a trajetória desejada.

A Figura 4.44 abaixo apresenta o ensaio realizado com UR = 60%.

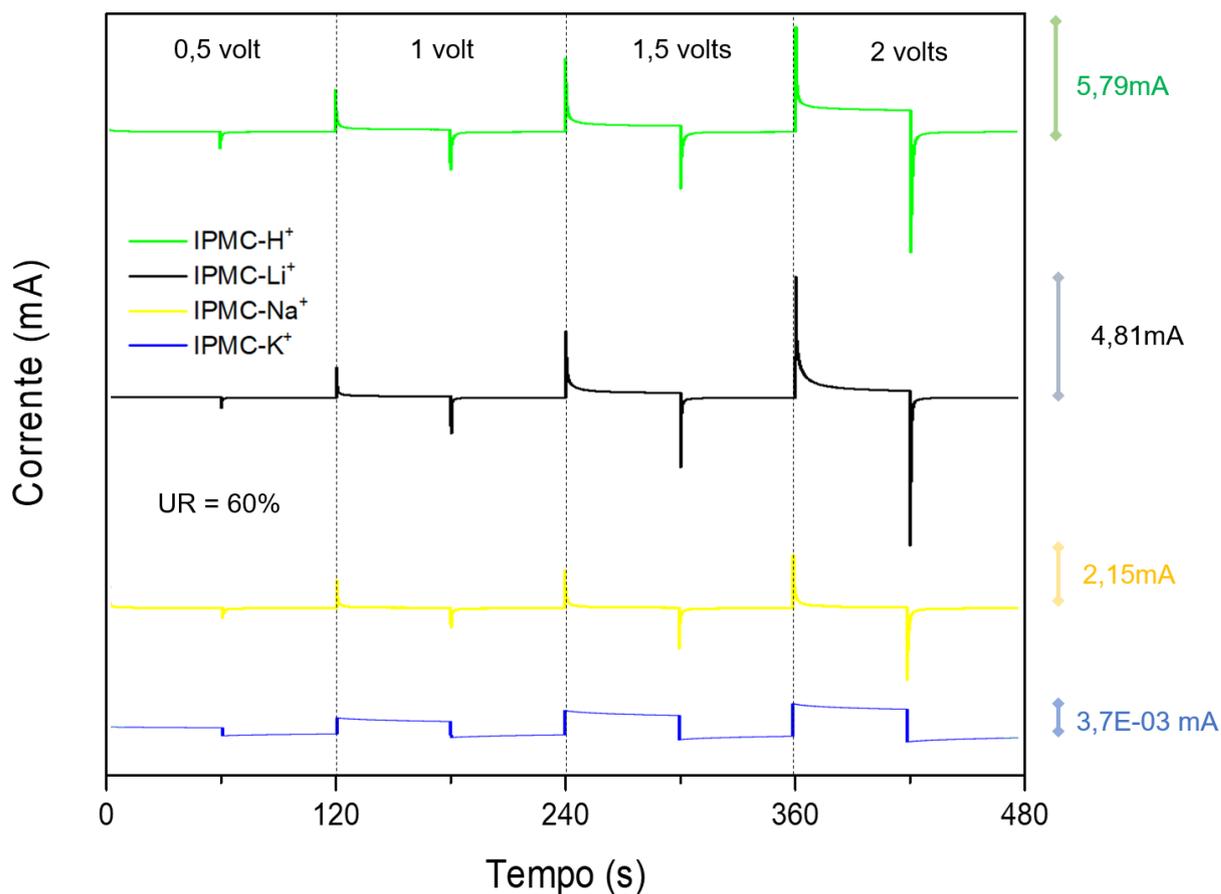


Figura 4.44 - Cronoamperometria em UR = 60%

A Tabela 4.7 abaixo, apresenta os dados coletados durante o ensaio realizado em UR = 60%

Tabela 4.7 - Resultado do ensaio de Cronoamperometria em UR = 60%

UR = 60%	Picos de corrente (mA)	Carga acumulada (C)
IPMC-H	5,79	353,96
IPMC-Li	4,81	101,59
IPMC-Na	2,15	258,46
IPMC-K	0,0037	0,27

Com o resultado do ensaio em UR = 60% é possível observar a resposta da corrente elétrica das amostras de IPMC em resposta à tensão aplicada. Como resultado do pico máximo de corrente para o IPMC-H foi igual a 5,79 mA

apresentando uma carga acumulada total de 353,96 Coulomb. Já para o IPMC-Li, o resultado de pico foi similar, igual a 4,81 mA apresentando carga acumulada inferior, 101,59 Coulomb.

O resultado do IPMC-Na foi, pico máximo de corrente de 2,15 mA com carga acumulada igual a 258,46 C. Por fim o de IPMC-K, foi de 0,0037 mA de pico com carga acumulada de 0,27 C. Nessa UR, o comportamento do IPMC-K foi levemente distinto do anterior, apresentando uma pequena inclinação na curva de descarregamento, isto significa que os portadores de carga, conseguem atravessar a membrana polimérica com mais facilidade.

A Figura 4.45 abaixo, apresenta o resultado do ensaio realizado em UR = 90%.

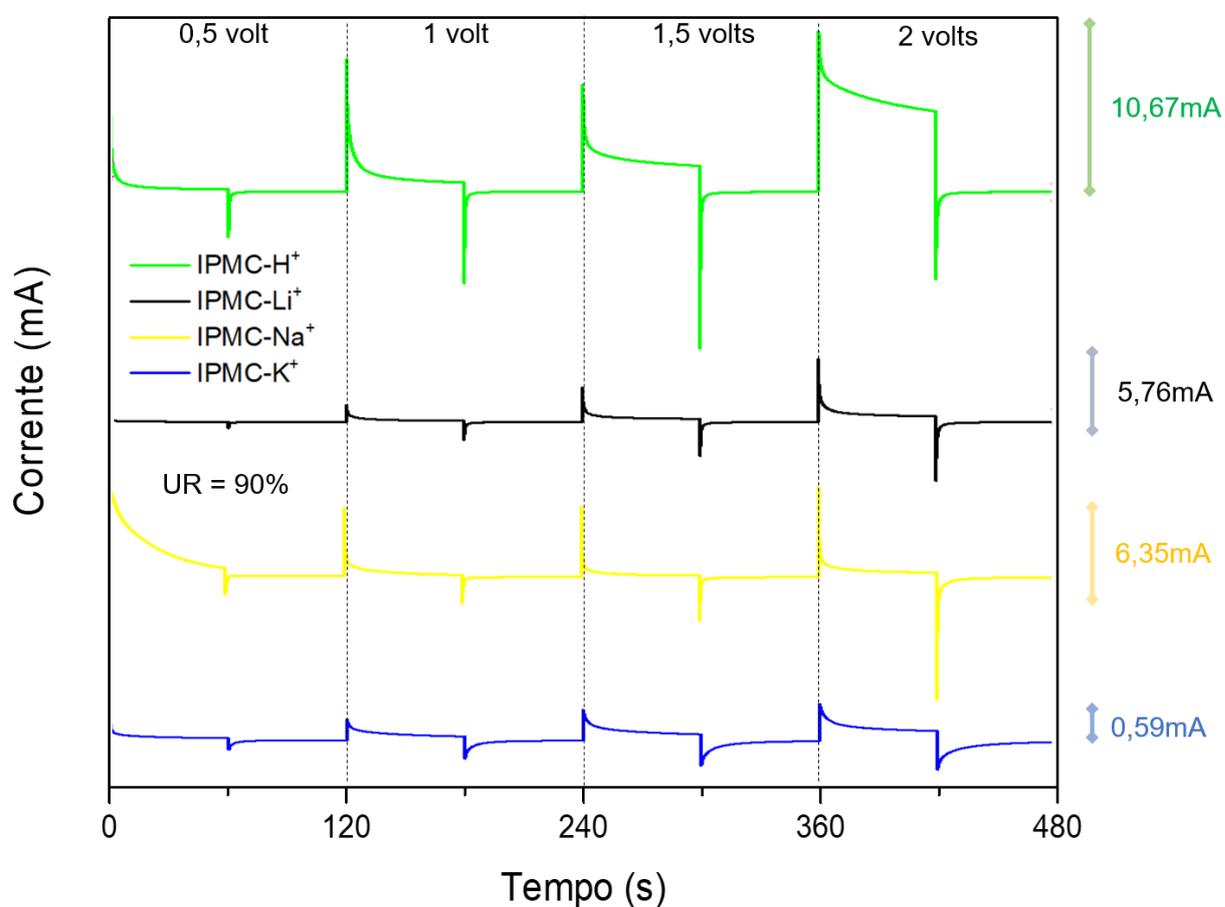


Figura 4.45 - Cronoamperometria em UR = 90%

A Tabela 4.8 abaixo, apresenta os dados coletados durante o ensaio realizado em UR = 90%.

Tabela 4.8 - Resultado do ensaio de Cronoamperometria em UR = 90%

UR = 90%	Picos de corrente (mA)	Carga acumulada (C)
IPMC-H ⁺	10,67	819,07
IPMC-Li ⁺	5,76	187,26
IPMC-Na ⁺	6,35	423,04
IPMC-K ⁺	0,59	20,05

Para o IPMC-H houve um acréscimo, tanto no pico de corrente em 2 volts de 10,67 mA quanto na carga acumulada, chegando aos 819,07 Coulomb. Percebe-se picos bem acentuados, indicando que nessa configuração a mobilidade iônica é grande e favorável. Uma constatação visual é a grande área sob da curva do IPMC-H quando comparada aos demais contra-íons. Isso é uma evidência de que a carga acumulada do IPMC-H é bem distinta quando comparada com outros contra-íons em alta UR, resultante principalmente, da mobilidade iônica de acordo com o mecanismo de Grotthuss, saturando prontamente o plano de Helmholtz externo (OHP) da dupla camada elétrica que surge logo após a aplicação de estímulo elétrico no IPMC, enquanto IPMC-Li, IPMC-Na e IPMC-K se difundirão mais lentamente por meio da difusão veicular.

Para o IPMC-Li, o pico mais acentuado foi pouco superior ao ensaio anterior, com valor máximo de 5,76 mA e carga acumulada também um pouco superior, no valor 187,26 C. Já para o IPMC-Na, o resultado de pico de corrente foi quase 3x maior que o anterior, no valor de 6,35 mA, superando o Li⁺ que possui um raio iônico menor que o próprio Na⁺. Isso significa que em ambiente com alta UR, íons maiores não encontram muita dificuldade em atravessar a membrana polimérica, já que os aglomerados hidrofílicos estão grandes e os canais ionoméricos estão com diâmetros maiores. Portanto, ao final apresentou uma carga acumulada de 423,04 C, isso significa, quase 3x maior que a carga do IPMC-Li.

O IPMC-K, finalmente, apresentou a curva similar aos demais contra-íons, um comportamento de carregamento instantâneo e descarregamento exponencial no tempo, e vice-versa, esse ambiente mais úmido promove uma mobilidade grande até nos contra-íons maiores fazendo com que favoreça a

difusão. O mesmo, apresentou pico mais significativo de corrente de 0,59 mA e carga acumulada de 20,05 C.

A Figura 4.46 apresenta um gráfico com o percentual de aumento da carga acumulada em função da UR.

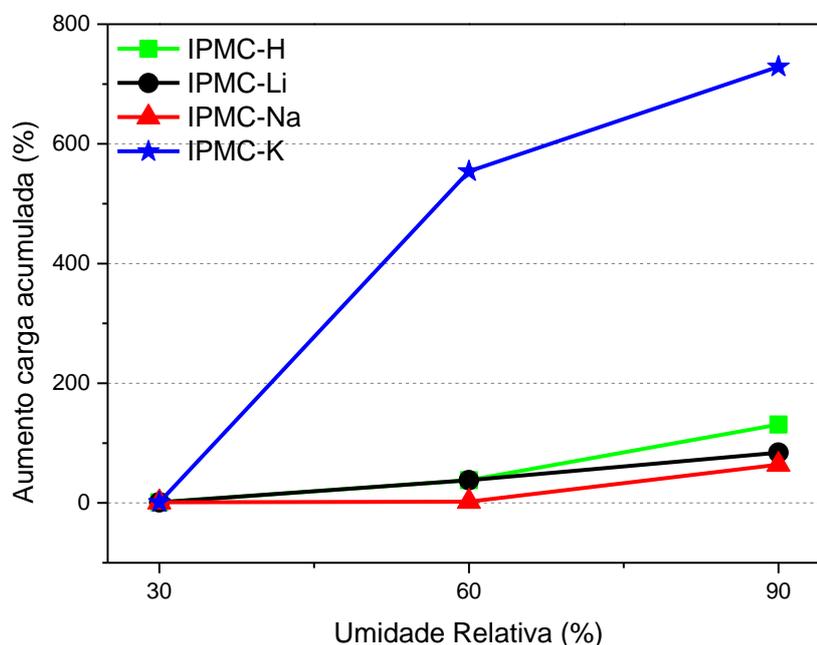


Figura 4.46 - Aumento da carga elétrica acumulada em função da UR.

As evidências colhidas após análise desse gráfico é que todos os contra-íons são favorecidos pelo aumento da UR. De imediato, o que se pode afirmar é que o IPMC-K possui maior incremento de carga com o aumento da UR, em 60% o incremento é de aproximadamente 550% em 90% é de aproximadamente 730%. Já o H⁺, é o segundo contra-íon mais afetado pela variação de UR, com incrementos de carga próximos a 38% na UR = 60% e 131% em ambiente com UR = 90%.

Nos casos do IPMC-Li e IPMC-Na ambos tiveram um incremento, no entanto, menos significativo com o aumento da UR. O IPMC-Li com aumento da carga em 38% e 84% nas UR de 60% e 90% respectivamente. Já o IPMC-Na sofre menos alterações na carga acumulada, com 2% e 64% para as URs de 60 e 90% respectivamente. Esses resultados vão ao encontro dos obtidos nos

gráficos de Bode analisados na seção anterior. Após avaliar esses resultados, há uma expectativa de que o sistema de controle tenha uma facilidade de controle para todos os contra-íons em ambientes com alta umidade. Contudo, conforme houver diminuição da UR, o mesmo terá maior dificuldades de ajustar e manter a trajetória, principalmente dos contra-íons K^+ e Na^+ em relação aos Li^+ e H^+ .

4.5 Controle de Trajetória de IPMC

Os ensaios de controle de trajetória da ponta do IPMC foram divididos em três grupos: **i)** controle de trajetória; **ii)** estabilidade no controle de trajetória; **iii)** performance no controle de trajetória. Cada um dos grupos de ensaios teve o objetivo específico de avaliar o desempenho do controlador frente às mudanças paramétricas, que além das DDPs constantes (1, 1,5 e 2 volts), foram: UR, contra-íons.

Inicialmente escolheu-se um contra-íon para realizar um ensaio preliminar para avaliar o sistema de controle desenvolvido. Esta escolha foi balisada em resultados obtidos anteriormente pelo grupo de pesquisa [52], [24] que apontaram o Li^+ como sendo um contra-íon da família dos metais alcalinos com melhor performance geral de desempenho eletromecânico.

4.5.1 Controle de trajetória do IPMC-Li

O primeiro grupo de ensaios foi realizado com tensões de -1 a +1 volt, o contra-íon incorporado foi o Li^+ e o tempo de ensaio foi delimitado arbitrariamente em 300 segundos. O objetivo desse ensaio foi avaliar a influência da UR no controle de trajetória do IPMC. As variações da UR foram: 90, 60 e 30%. Após o ensaio, as análises realizadas foram: elétrica, deslocamento, taxa de deslocamento e coeficiente de determinação (R^2).

Com a finalidade de utilização de um atuador IPMC-Li como um dispositivo de manipulação (por exemplo, micro pinça) em diversos cenários distintos de trabalho, um controle de alta precisão é necessário [164]. Assim, para verificar a capacidade de rastreamento da posição do sistema, um ensaio

simples de trajetória (ajustada arbitrariamente no LabView) em função do tempo foi realizada. O tempo total do ensaio foi de 300s para cada trajetória e ao avaliar que o IPMC alcançava a trajetória ajustada, a mesma era alterada pelo usuário. O controlador PI foi ativado, estimulando eletricamente o IPMC com tensões máximos entre -1 até +1V. A *webcam* capturou o deslocamento resultante (deslocamento da ponta do IPMC) e o algoritmo de visão de máquina retroalimentou o sistema de controle. Nessa análise, foram utilizadas UR = 90, 60 e 30%. O objetivo dessa variação é trabalhar em três situações distintas e avaliar a influência da UR no desempenho do sistema de controle aqui desenvolvido. Em 90%, a resposta mecânica do dispositivo é a mais rápida possível [3], portanto, espera-se que com essa UR, o sistema apresente o melhor desempenho.

Além do mais, uma avaliação da quantidade de deslocamentos (variação de posição) obtidos durante o ensaio, taxa de deslocamento e coeficiente de determinação (R^2) entre as variáveis foram realizadas. O objetivo da análise estatística foi de avaliar a variância da variável dependente (deslocamento) a partir da variável independente (tempo). A Figura 4.47 ilustra o resultado do primeiro ensaio.

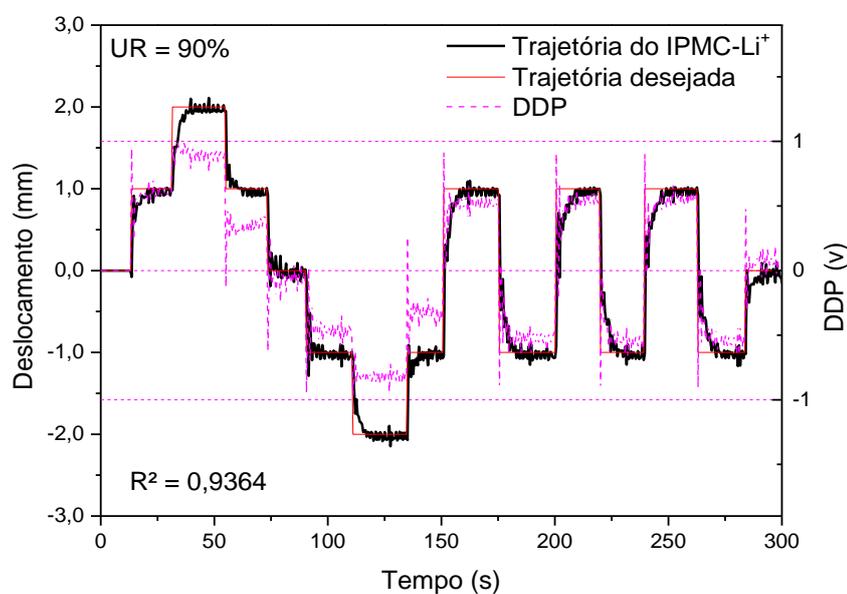


Figura 4.47 – Deslocamentos registrados a partir da *webcam* no controle de trajetória com UR = 90% para o IPMC-Li⁺

Conforme observado, assim que o sistema de controle foi ativado, o IPMC moveu-se para a primeira trajetória desejada. Poucos segundos após o IPMC atingir a trajetória de deslocamento determinada, esta foi alterada, forçando um novo deslocamento. A primeira trajetória desejada foi de 1,0 mm e o IPMC atingiu sua posição final após aproximadamente 10,0 segundos de um total de aproximadamente 18,0 segundos da trajetória desejada. No geral, não foram observadas variações significativas, mesmo quando o deslocamento da ponta foi realizado na direção oposta.

Além disso, a *webcam* foi capaz de rastrear a posição do IPMC com alta velocidade e precisão, fornecendo *feedback* em tempo real e sinal de alta qualidade para o sistema de controle. Este, por sua vez, foi capaz de ajustar rapidamente o sinal elétrico de saída, apresentando picos de DDP apenas nos momentos de mudança de trajetória (conforme observado no eixo y secundário do gráfico). No entanto, apresentou saturação de DDP em dois momentos, próximos aos aproximadamente 30 segundos em +1 volt e aproximadamente 110 segundos em -1 volt. Isso significa que o atuador teria potencial de se deslocar a uma distância maior do que foi definida. Porém, não era escopo desse ensaio verificar o deslocamento máximo da ponta do IPMC e sim verificar se o sistema de controle desenvolvido controlaria de maneira satisfatória o IPMC. Nemat-Nasser e Wu [44] estudaram com precisão o movimento de alta frequência dos IPMCs com uma câmera de alta velocidade (120 quadros/seg).

Por outro lado, Tsiakimakis et al. [165], usou uma câmera CCD (30 quadros/seg) para monitorar o movimento do IPMC embaixo d'água (condição de baixa frequência - 0,5 Hz ou menos). Em ambos os casos, não foram observados problemas de monitoramento. No entanto, Tsiakimakis afirma que problemas de monitoramento podem aparecer quando movimentos de alta frequência são rastreados por câmeras de taxa de quadros limitada (25-30 quadros/seg). Entretanto, como observado, o movimento de flexão rápida foi monitorado com precisão e qualquer perturbação do sistema não foi observada.

Em 60% de UR, se esperava que o sistema apresentasse um desempenho satisfatório, baseando-se na resposta eletromecânica que o IPMC apresentou nessas condições [3], [33], [34]. O ensaio seguiu a premissa do

ensaio anterior, porém, as posições de ajuste e as quantidades dessas foram distintas, pois de antemão, sabia-se que não seria possível alcançar as posições ajustadas no ensaio anterior devido à UR mais baixa e da diferença entre propriedades elétricas dos eletrodos, apresentadas na seção 4.3.2.

A Figura 4.48 ilustra o deslocamento da ponta do IPMC e a DDP aplicada pelo sistema de controle para mantê-lo na posição ajustada em função do tempo com UR = 60%.

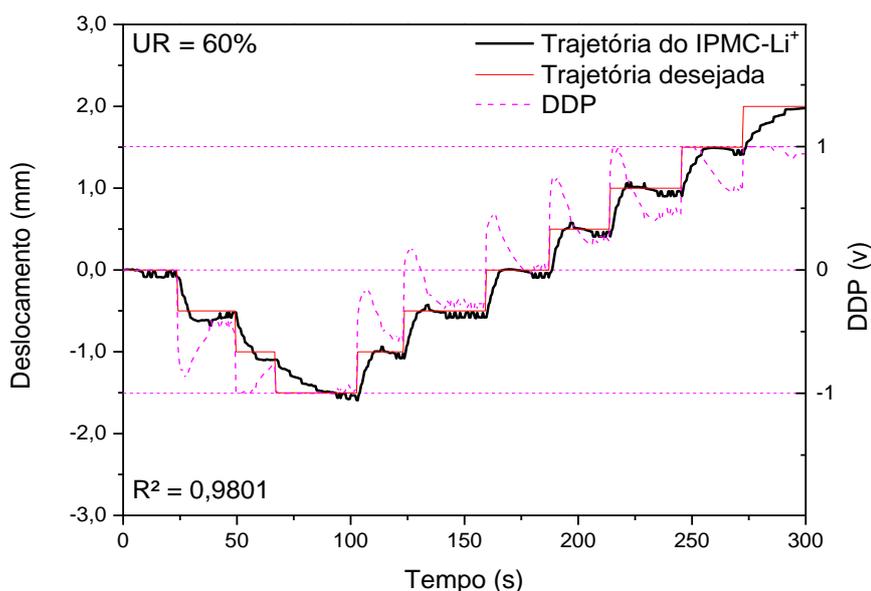


Figura 4.48 - Deslocamentos registrados a partir da *webcam* no controle de trajetória com UR = 60% para o IPMC-Li⁺

Na Figura 4.48 é possível observar o comportamento do atuador IPMC em relação a posição desejada. Inicialmente a trajetória desejada foi definida para a posição a - 0,5 mm da posição inicial, imediatamente o sistema de controle foi ativado aplicando uma DDP negativa (com pico de DDP próximo aos aproximadamente 25 segundos), essas variações bruscas de DDP são decorrentes da mudança da trajetória desejada, já que para o sistema ajustar o atuador IPMC na posição correta é necessário receber o comando para aumentar ou diminuir a DDP de acordo com a sintonia do controlador. Além disso, é possível perceber que quanto mais próximo do ponto de saturação da DDP (-1 e +1 volt), mais lenta é a transição do IPMC para a trajetória desejada.

Analisando essa lentidão de deslocamento para explicar o que ocorre dentro do material, algumas hipóteses podem ser levantadas. Pode ser tanto pela saturação dos canais em uma das faces do IPMC com os íons solvatados quanto pela própria resistência do material à deformação (relação tensão x deformação do polímero em si – maiores deformações exigem maiores tensões mecânicas), principalmente porque o polímero com mais água é mais maleável, ou seja, tem menor módulo elástico. Seguindo nessa premissa de diminuição do módulo elástico em função da quantidade de água, espera-se que quanto menor for a UR, maior será o módulo elástico e conseqüentemente mais lento será o movimento.

Essa saturação é perceptível em dois pontos do gráfico, nos tempos entre aproximadamente 50 até 100 segundos significando que o IPMC chegou na posição de deslocamento máximo negativo. Outro momento de saturação foi próximo aos 275 segundos, onde a saturação na DDP de +1 volt já está explícita e o movimento do IPMC ocorre de forma mais lenta em relação ao início dos movimentos.

Além dessas constatações, o deslocamento máximo negativo foi de 1,5 mm, isto é, menor e nitidamente mais lento do apresentado no resultado de 90%. Esse resultado já era esperado, já que na condição desse ensaio, a amostra estava como um menor teor de moléculas de água, além da diferença de condutividade elétrica entre os eletrodos, já mencionado anteriormente e isso privou o atuador de se deformar rapidamente e em grande intensidade.

Vunder et al. [166] estudaram a influência da umidade e da temperatura no comportamento do IPMC conduzindo testes em uma faixa de UR e temperatura de 30-58% e 23-29°C, respectivamente. Eles concluíram que o fator de condição mais significativo para um bom desempenho é a umidade relativa. Já Hirano et al. [46] realizaram um estudo de força de bloqueio em diferentes condições de RH. Eles evidenciaram que a força de bloqueio e a relaxação reversa aumentaram com o aumento da UR. Foi inferido que em condições mais úmidas, a amostra é mais flexível e maior quantidade de moléculas de água promovem maior difusão dos íons.

Para o ensaio realizado em UR = 30%, um ambiente seco, se esperava do sistema um desempenho mais baixo em relação aos demais, já que ambientes mais secos diminuem significativamente a velocidade de deslocamento do atuador IPMC [3]. Além disso, esperava-se uma rápida saturação da DDP, já que com menor mobilidade iônica, haveria uma maior intensidade da DDP máxima durante o ajuste de trajetória fornecida pelo sistema de controle desenvolvido.

A Figura 4.49 apresenta a trajetória do IPMC em função do tempo com UR = 30%. Ao contrário dos ensaios em 90 e 60%, nesse, novos deslocamentos foram determinados já prevendo a dificuldade dos movimentos.

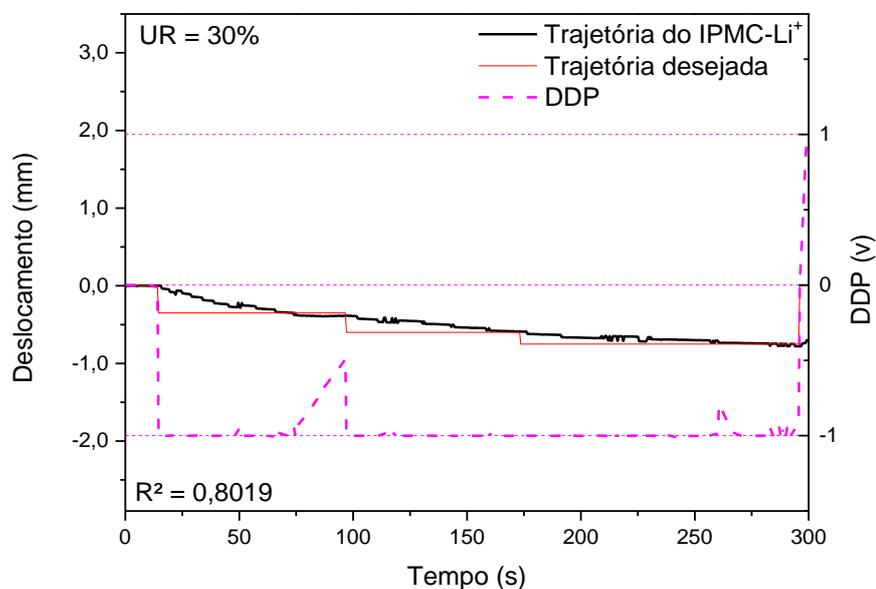


Figura 4.49 - Deslocamentos registrados a partir da *webcam* no controle de trajetória com UR = 30% para o IPMC-Li⁺

Observando a Figura 4.49, percebe-se a dificuldade do IPMC para alcançar a trajetória desejada, além disso, o tempo necessário para realizar esse deslocamento é alto. A quantidade de transições de posição realizados nesse ensaio são inferiores aos anteriores já que para haver a troca de posição do IPMC era necessário que o mesmo chegasse ao ponto ajustado e isso ocorreu muito lentamente.

A primeira mudança de trajetória apresentou um tempo de aproximadamente 70 segundos para a ponta do IPMC atingir a trajetória desejada. E as demais transições tendem a demorar mais tempo que a inicial, já que com a membrana pouco hidratada o sistema saturou em -1 volt rapidamente. Com poucas moléculas de água no interior da membrana polimérica, há uma clara dificuldade de transição do contra-íon solvatado no interior dos canais ioméricos, e conseqüentemente de realizar o movimento.

Conforme corroborado por Gavach et al. [39] explicando que com a redução do grau de hidratação, há uma contração dos canais ioméricos no interior da membrana polimérica. Logo, conforme o grau de hidratação varia, haverá variações na distância entre as espécies carregadas (grupos SO_3^- e contra-íons).

A lentidão de movimento apresentada pelo atuador IPMC não significa que o sistema de controle é ineficaz, muito pelo contrário, como pode ser observado próximo aos aproximadamente 295 segundos, há uma pequena mudança na trajetória desejada (ajuste na posição inicial), e o sistema rapidamente inverte a DDP para +1 volt tendo como resposta uma lentidão de movimentação por parte do atuador, devido a baixa UR. Por fim, como conclusão desse ensaio, o sistema de controle apresentou uma resposta rápida quando submetido à troca de posição provando ser eficaz.

A Tabela 4.9, apresenta um resumo dos resultados alcançados no controle de trajetória para o IPMC-Li⁺

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de controle de trajetória para o IPMC-Li⁺

Contra-íon	UR (%)	Varição de posição	Taxa de deslocamento médio (mm/s) *	Coefficiente de Determinação (R ²)
	90	14	2,68	0,93
IPMC-Li	60	10	0,68	0,98
	30	3	0,06	0,80

* A taxa de deslocamento médio foi calculada utilizando o tempo necessário para o atuador atingir a trajetória desejada em função da quantidade de posições.

O resultado do ensaio realizado com UR = 90% apresentou uma maior variação de posição alcançadas pelo IPMC (14) já que o ensaio foi realizado em

ambiente mais úmido e, portanto, favorável à movimentação iônica. A taxa de deslocamento foi de 2,68 mm/s; além dessas informações, um alto coeficiente de correlação entre as variáveis avaliadas foi obtido. Isso significa que o atuador IPMC esteve em concordância com a posição ajustada em 93% do ensaio.

Nos resultados obtidos em UR = 60%, uma menor variação de posição (10) foi obtida, também as transições tiveram pequenos deslocamentos (máximo de 0,5 mm). Essa combinação de fatores provocou um resultado estatístico muito bom, com o coeficiente de correlação em mais de 98%. Os resultados estatísticos comprovam que houve uma forte relação entre as variáveis analisadas, isso significa, que o controlador realizou bem sua tarefa. Um indicador que foi diminuído foi o de taxa de deslocamento (0,68 mm/s) o que já era esperado. Esse valor inferior ao do ensaio anterior represente bem como a mudança de UR afeta na velocidade de deslocamento do atuador.

O ensaio realizado em UR = 30% apresentou poucas variações de posição (3) no tempo total do ensaio, os valores estatísticos ficaram abaixo dos demais realizados, muito em função da baixa velocidade de transição do atuador até a trajetória desejada. Esse resultado evidencia ainda mais a importância da UR para o bom desempenho do atuador IPMC. Sua velocidade de deslocamento (0,06 mm/s) foi comprometida pelo enrijecimento da amostra devido à falta de água no interior do polímero. O valor do coeficiente de correlação nesse ensaio foi de aproximadamente 80%, representando que ainda assim, houve uma relação interessante entre as variáveis analisadas.

Por fim, ao analisar os resultados gerais dos ensaios é possível mostrar a eficiência do controlador desenvolvido neste trabalho. Apesar das comparações estatísticas não terem sido realizadas utilizando as mesmas condições de trajetória desejadas e variações de posições, já é um indicativo que o controlador se mostrou eficiente e cumpriu com o objetivo proposto. Na próxima seção, um novo ensaio avaliando a estabilidade do controlador é apresentado.

4.6 Análise de Estabilidade do Controle PI

O sistema de controle também deve ser capaz de manter a estabilidade, mesmo na presença de distúrbios ou variações, garantindo confiabilidade [136]. Ao projetar um controlador, é necessário avaliá-lo em diferentes tipos de estímulos elétricos como: degrau, rampa, pulso, dentre outros [19]. Neste trabalho, utilizou-se a resposta do sistema ao estímulo degrau que comumente avalia alguns parâmetros [74], [94] - já discutido anteriormente na seção 2.5.1.

Um estudo completo da resposta do sistema com tipo de estímulo em degrau foi realizado utilizando o contra-íon Li^+ . Nesse primeiro momento, avaliou-se a influência de diferentes DDP's (1, 1,5 e 2 volts) e UR's (90, 60 e 30%) na resposta do sistema de controle.

Em um segundo momento, o sistema de controle foi avaliado com a amostra de IPMC com diferentes contra-íons (H^+ , Na^+ e K^+). Contudo, esses ensaios foram realizados em DDP constante = 2 volts e variações na UR (90, 60 e 30%) com o objetivo único de avaliar a influência do tipo/tamanho do contra-íon combinados com a mudança de UR no comportamento do sistema de controle. Abaixo é apresentado o primeiro ensaio realizado com o IPMC-Li em UR constante de 90% e variando a DDP.

4.6.1 Estabilidade do controlador para o atuador IPMC-Li em UR = 90% com variações na DDP

Com o objetivo de avaliar a estabilidade do controlador desenvolvido, um ensaio por um período de 600 segundos foi realizado. Ajustou-se a trajetória desejada no sistema de controle com variações máximas de DDP's de 1, 1,5 e 2 volts em UR = 90%. Os deslocamentos com as respectivas DDP's foram definidos arbitrariamente como: **i)** deslocamento de 5,0 mm e -4,0 mm para +2 e -2 volts; **ii)** deslocamento de 4,3 mm e -3,7 mm para +1,5 e -1,5 volts e; **iii)** 2,3 mm e -2,9 mm para +1 e -1 volt. Esses valores de deslocamento foram obtidos em ensaios preliminares e com base nele, foram utilizados a posteriori nesse ensaio. A Figura 4.50 apresenta os resultados dos ensaios em UR = 90%.

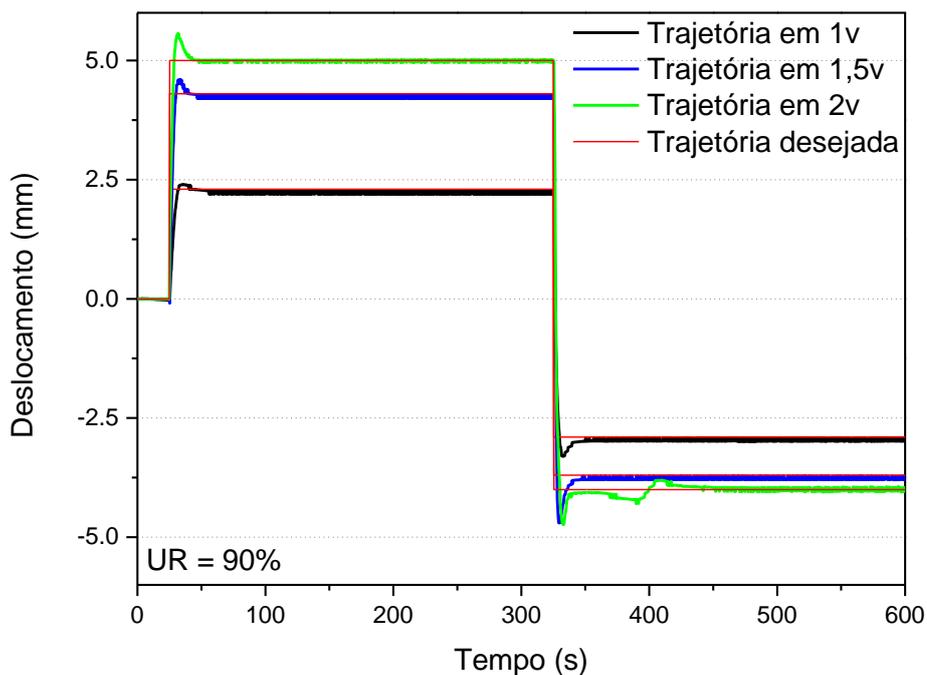


Figura 4.50- Variação da trajetória do IPMC em relação a DDP aplicada.

Após ajuste das trajetórias e valores da DDP máxima configurados no sistema de controle, o ensaio foi iniciado. O atuador IPMC iniciou o deslocamento até o valor ajustado. Os tempos de subida foram respectivamente de aproximadamente 15 segundos para 2 volts, aproximadamente 8 segundos para 1,5 volts e aproximadamente 10 segundos para 1 volts, todos os três resultados apresentaram *overshoot*, sendo de aproximadamente 10%, aproximadamente 7% e aproximadamente 4% respectivamente. Apresentando uma característica de um sistema de controle de segunda ordem [167]. Para o ensaio de -2 a 2 volts, o *overshoot* mais significativo foi consequência da DDP aplicada somados à UR, causando um rápido movimento do atuador IPMC. Contudo, é possível perceber a ação do controlador ajustando a posição do IPMC, com tempo de acomodação aos aproximadamente 45 segundos. Após esse período o controlador mantém o IPMC no intervalo aceitável de ajuste ($\leq 5\%$) até o final dos 300 segundos. Ao ocorrer a troca do valor de ajuste, a DDP é invertida para -2 volts, o IPMC apresenta comportamento similar ao anterior, com um *overshoot*

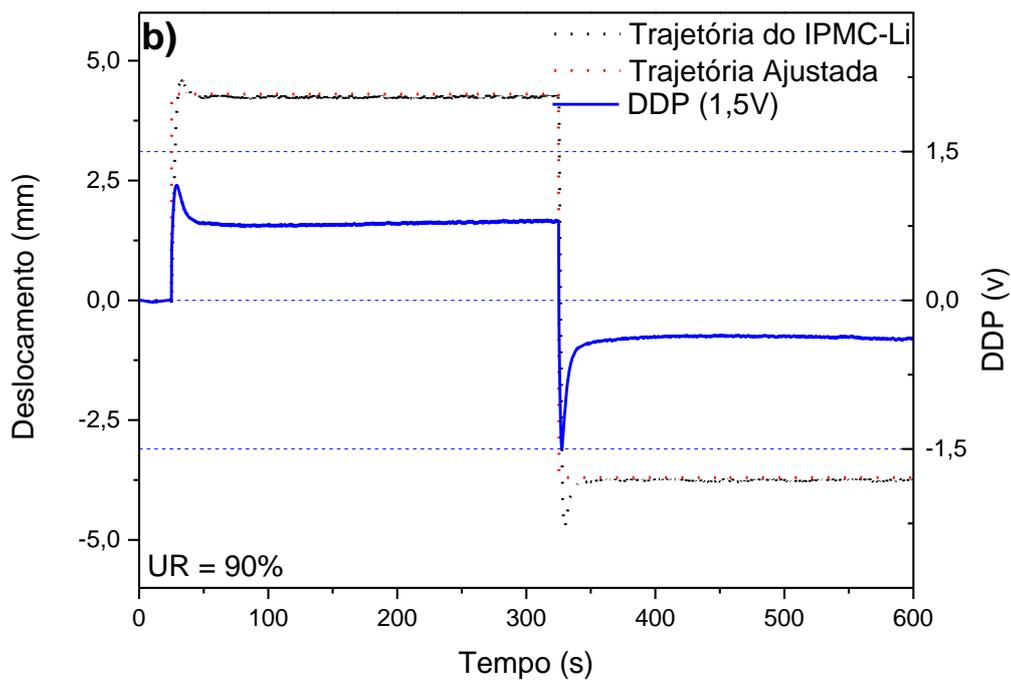
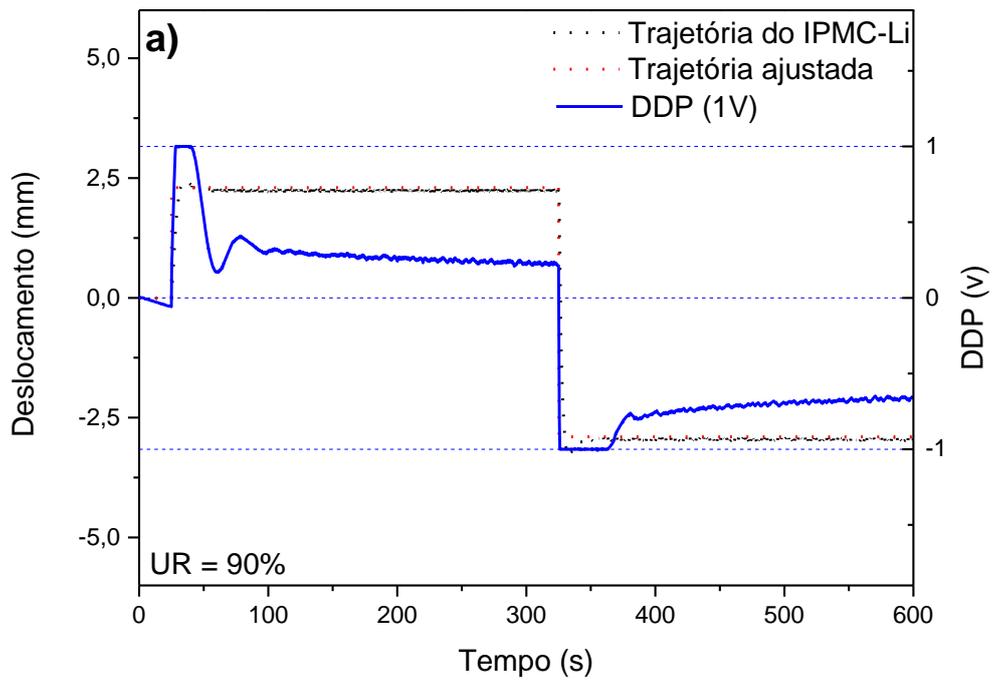
de aproximadamente 8%. Para as tensões de -1 e -1,5 volts os comportamentos são similares ao anterior, com *overshoot* de aproximadamente 11% e 12% respectivamente. Porém, em todos os casos, ao ultrapassar a posição de ajuste é visível a ação do controlador no ajuste da posição do atuador.

Como mencionado anteriormente, muitos trabalhos controlaram efetivamente os IPMCs usando controladores PID [10], [11], [13]–[18], [168], [169]. Em vez disso, muitos outros pesquisadores escolheram um controlador PI devido à sua simplicidade [79], [170]–[172]. Kean et al. [173] projetam um controlador PI para monitorar um instrumento cirúrgico robótico com um mecanismo de articulação esquelética acionado por IPMC. O dispositivo trabalhou conforme o esperado, fornecendo vários ajustes de corte com precisão razoável. Hunt et al. [174] apresentou um controle PI de *feedback* baseado em câmera sensor-atuador IPMC. Eles consideram que a configuração proposta foi relativamente bem-sucedida e pode ser usada com algumas melhorias.

Tondu et al. [167] demonstraram que um controlador PI linear, incluindo restrições de DDP, é uma abordagem simples e eficiente para um controle em malha fechada de atuador de posição. Como análise complementar, a Figura 4.51, apresenta como o sistema de controle geriu a DDP para ajustar e manter as posições do IPMC deste ensaio.

4.6.1.1 Resposta elétrica do controlador no ensaio de estabilidade para o IPMC-Li

Além de observar que o sistema de controle se mostrou eficaz nas mudanças de trajetória do IPMC-Li em diferentes aplicações de DDP, uma análise complementar será apresentada nesta seção, mostrando a ação do controlador no fornecimento de DDP para manter o atuador IPMC na trajetória desejada. A Figura 4.51 apresenta essa ação, ilustrando a aplicação do estímulo elétrico necessário frente à mudança de trajetória, conforme mencionado na seção anterior. No eixo y secundário é apresentada a DDP com a linha de grade tracejada representando a DDP máxima ajustada no DAQ durante a realização do ensaio.



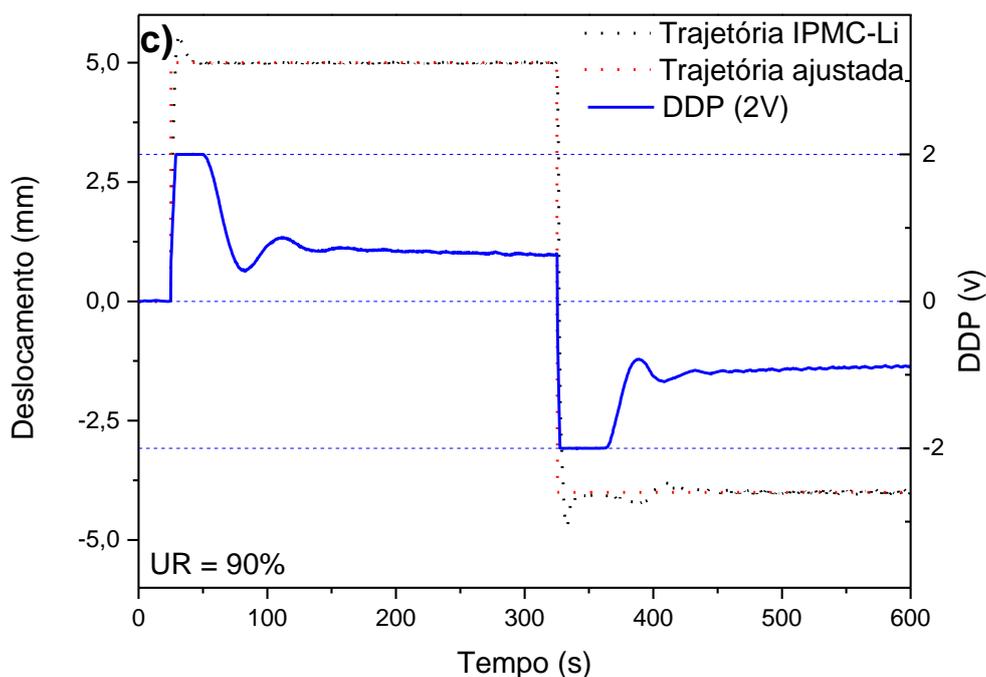


Figura 4.51 - Resposta elétrica durante os ensaios – **a)** 1; **b)** 1,5; **c)** 2 volts em UR = 90%.

Ao iniciar o ensaio e ajustar a posição desejada, o controlador ajusta a DDP necessária no IPMC de acordo com o método de sintonia. O gráfico Figura 4.51.a apresenta a resposta elétrica do controlador PI para manter a posição do atuador. Percebe-se no início do ajuste de posição um pico de DDP de +1 volt próximo aos 60 segundos e logo na sequência a DDP diminui ao aproximar o atuador da posição desejada. Ao inverter a posição, o sistema de controle ajusta uma DDP negativa de imediato em resposta à ação de controle e por aproximadamente 70 segundos mantém a DDP em -1 volt, após esse período, o controlador estabiliza a DDP de forma a manter a posição do IPMC ajustada. Os dois picos de *overshoot* são típicos de um sistema de controle de segunda ordem, no entanto, somente o pico é significativo de aproximadamente 8%, no primeiro caso não foi significativo, isto é, $\leq 5\%$.

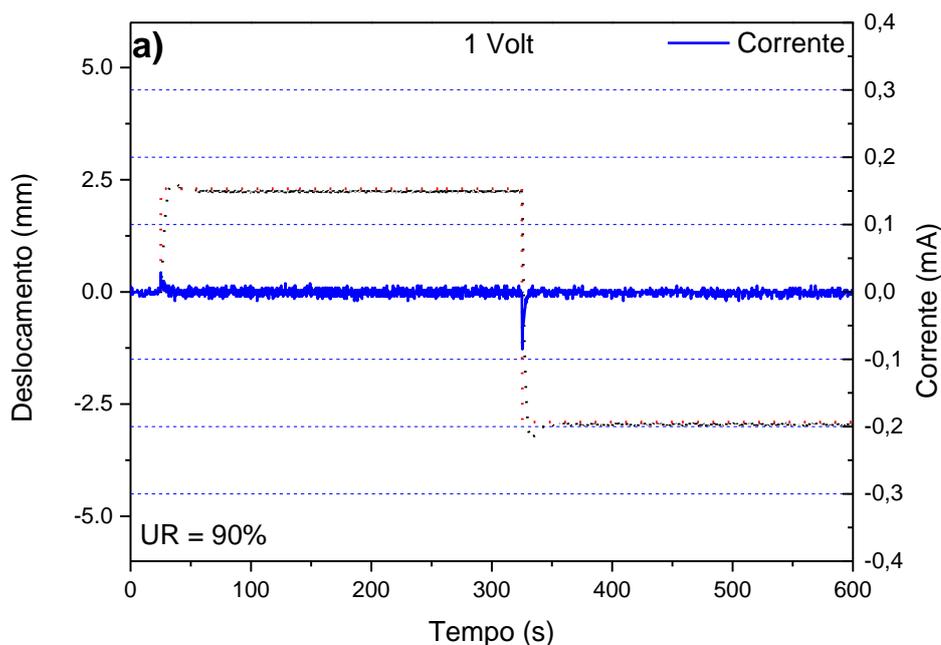
A Figura 4.51.b apresenta a resposta elétrica durante o ensaio em -1,5 e +1,5 volts, nesse caso é possível perceber a ação do controlador para manter o atuador na posição desejada. Os *overshoots* apresentados foram de

aproximadamente 7% no primeiro pico e 12% no segundo pico. Esse valor maior do segundo pico, é proveniente de um maior deslocamento do IPMC, resultado em uma resposta mais lenta do controlador para ajustar a posição.

A Figura 4.51.c apresenta o resultado elétrico de -2 a +2 volts e conforme os anteriores, o controlador se mostrou eficaz ao manter a posição ajustada do atuador. Por fim, após a realização do ensaio foi possível avaliar a funcionalidade do controlador frente aos diferentes potenciais elétricos aplicados e como o mesmo manteve o atuador na posição ajustada.

4.6.1.2 Comportamento da corrente elétrica na estabilidade do controlador

Outro parâmetro importante a ser avaliado relacionado às características elétricas é a corrente elétrica. A mesma foi monitorada e analisada em resposta ao movimento do IPMC-Li. A Figura 4.52 abaixo, apresenta a resposta da corrente elétrica consumida (eixo y secundário) durante o ensaio de estabilidade.



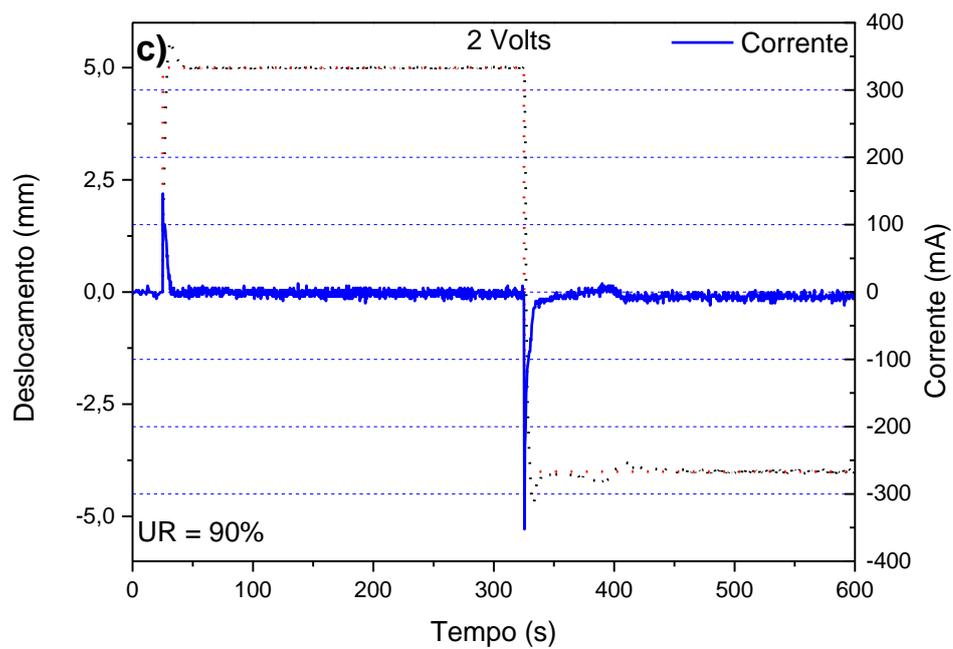
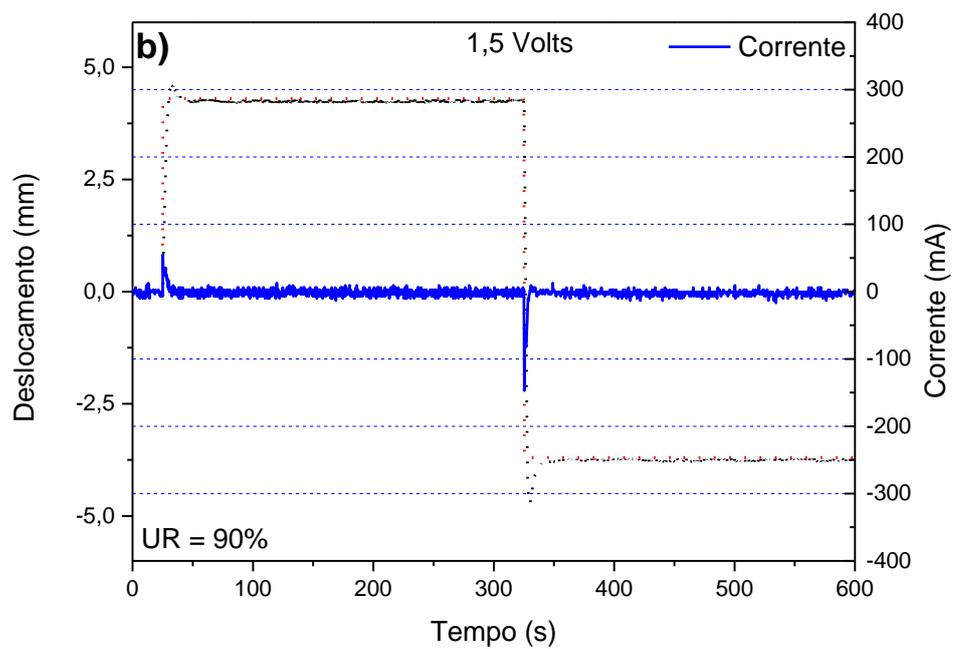


Figura 4.52 - Resposta da corrente elétrica consumida durante o ensaio de estabilidade em UR = 90% para **a)** 1; **b)** 1,5 e; **c)** 2 volts

Os gráficos contidos na Figura 4.52 apresentam o comportamento da corrente elétrica durante a realização do ensaio. É notório que o comportamento da corrente elétrica - principalmente os picos de corrente - vão ao encontro dos resultados do comportamento da DDP, apresentando uma maior corrente elétrica consumida nos momentos de troca de posição do atuador, e para tal, o sistema forneceu um fluxo maior de energia. Para o ensaio de 1 volt, o pico de corrente na primeira etapa do ensaio foi próximo aos 30 mA, enquanto o de 1,5 volts foi 55 mA e o de 2 volts foi próximo de 150 mA.

Já na segunda etapa, onde o deslocamento foi maior, a corrente elétrica consumida também foi maior, em 1 volt foi de 90 mA, 1,5 volts = 150 mA e para 2 volts = 350 mA. Nos demais pontos do ensaio, a corrente elétrica apresentou um comportamento estável com poucas flutuações.

4.6.2 Estabilidade do controlador para o atuador IPMC-Li em UR's

Com intuito de avaliar a influência da UR no sistema de controle proposto, variações na UR foram definidas em 30, 60 e 90%. As DDP's utilizadas nos ensaios foram de -1 a +1, -1,5 a +1,5 e -2 a +2 volts e os ajustes de deslocamento foram os mesmos utilizados no ensaio realizado na seção 4.6.1. Espera-se que com as variações na UR o sistema de controle seja capaz de ajustar o atuador IPMC-Li na posição desejada, compensando uma eventual lentidão no ajuste da trajetória aumentando a DDP aplicada. Além disso espera-se identificar fenômenos que ocorrem no material derivados da mudança de UR nesse tipo de dispositivos.

A Figura 4.53 apresentam os resultados obtidos após realização dos ensaios.

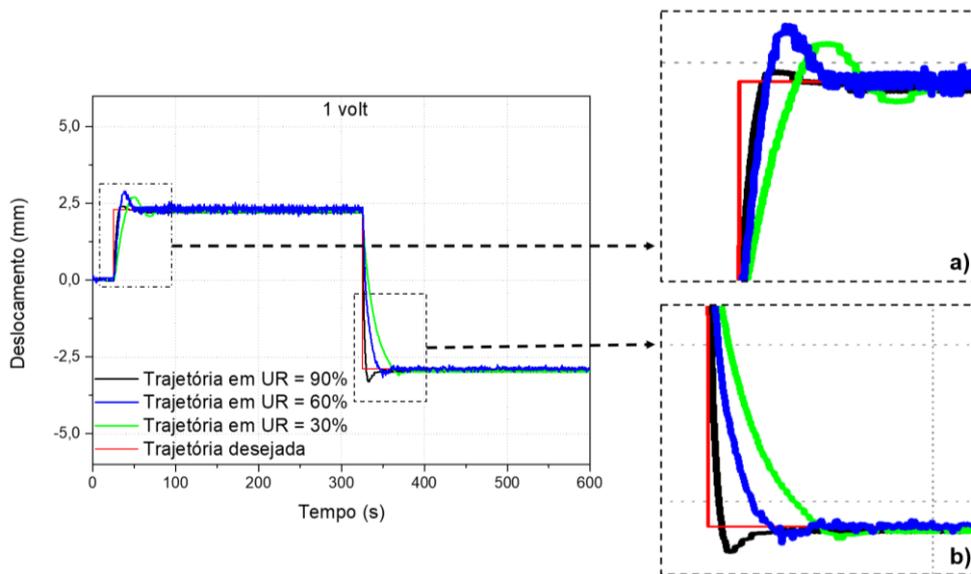


Figura 4.53 - Estabilidade do controlador em diferentes UR's para DDP = 1 volt; **a)** detalhe ajuste posição direita; **b)** detalhe no ajuste da posição esquerda.

A Figura 4.53 apresenta a resposta de deslocamento do IPMC com tensões de -1 a +1 volt em função do tempo. Cada curva do gráfico representa uma UR diferente para o mesmo deslocamento e para o mesmo ajuste de posição. Ao modificar a posição de ajuste para 2,3 mm no tempo de 25 segundos, o sistema aplica uma DDP positiva para levar o atuador até a posição da direita ajustada (ênfase na Figura 4.53.a). Entretanto, é possível perceber que as taxas de deslocamento foram distintas. Na curva de UR=90%, a linha do ajuste é cruzada em aproximadamente 14 segundos, ou seja, em taxa de deslocamento médio de 1,6 mm/s. Na curva de UR=60%, o atuador ultrapassa o ajuste próximo aos 16 segundos, isto é, em taxa média de 1,4 mm/s, na UR = 30% o atuador chega até a posição ajustada em aproximadamente 30 segundos em taxa média de 0,766 mm/s. Em todas as três UR o sistema foi capaz de levar o atuador até a posição ajustada e mantê-lo estável.

Na transição do ajuste (ênfase na Figura 4.53.b), onde ocorre o maior deslocamento do atuador em 350 segundos, o sistema ao inverter a posição de ajuste, e com isso, inverte também a DDP de +1 para -1 volt para ajustar a posição do atuador. Nesse caso, fica ainda mais evidente a diferença entre as taxas médias de deslocamento do atuador. Para 90% de UR, o tempo de transição de uma posição até a outra foi de aproximadamente 18 segundos, em

taxa de 2,8 mm/s em 60% foi em torno de 22 segundos, em taxa de 2,3 mm/s e para 30% foi em torno de 37 segundos, em 1,4 mm/s. Portanto, essas evidências corroboram que o deslocamento do atuador IPMC depende do nível de hidratação da matriz polimérica [175] afetando diretamente a rigidez (módulo elástico) e a mobilidade iônica. [44].

A Figura 4.54 abaixo, apresenta o ensaio com DDP entre -1,5 a 1,5 volts.

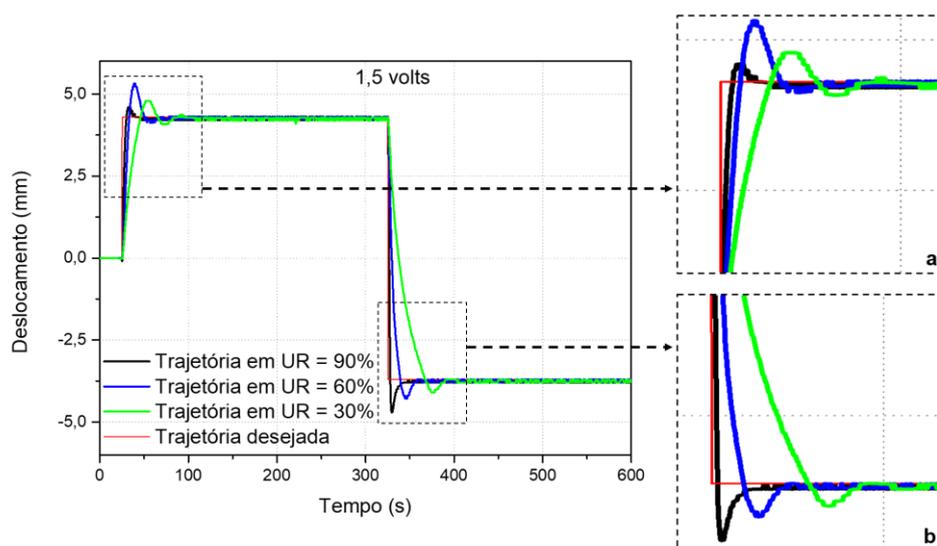


Figura 4.54 - Estabilidade do controlador em diferentes UR's para DDP = 1,5 volts; **a)** detalhe ajuste posição direita; **b)** detalhe no ajuste da posição esquerda.

É possível perceber que aos 25 segundos houve o ajuste de posição do atuador (ênfase na Figura 4.54.a), e conseqüentemente houve a aplicação da tensão pelo sistema no IPMC. Em resposta, o IPMC se desloca até manter a posição ajustada. Contudo, conforme no ensaio anterior, fica explícito, as diferenças de taxa de deslocamento médio para cada UR. Em 90%, observa-se uma taxa de deslocamento de 8,6 mm/s, assim, a posição de ajuste foi alcançada em 5 segundos. Para 60%, obteve-se uma taxa de deslocamento de 5,0 mm/s, atingindo a posição ajustada próximo aos 8,5 segundos. Para 30%, a posição ajustada foi alcançada em 21 segundos, isso significa, em taxa de deslocamento médio de 2,0 mm/s. Em todas as UR o IPMC chegou à posição ajustada e manteve-se estável até o final do primeiro intervalo do ensaio (300 segundos).

No segundo intervalo do ensaio (ênfase na Figura 4.54.b), as constatações são as similares. Com 90% de UR, o IPMC atingiu a posição

ajustada em aproximadamente 5,0 segundos com taxa de deslocamento médio de 12,0 mm/s. Em 60%, a taxa foi de 4,1 mm/s necessitando de 14,5 segundos para o IPMC atingir o ponto de ajuste. Já para 30%, foi necessário um tempo de 42,5 segundos com taxa de 1,8 mm/s para atingir o ponto de ajuste necessário.

A Figura 4.55 abaixo, apresenta os resultados do ensaio com aplicação de DDP de -2 a 2 volts.

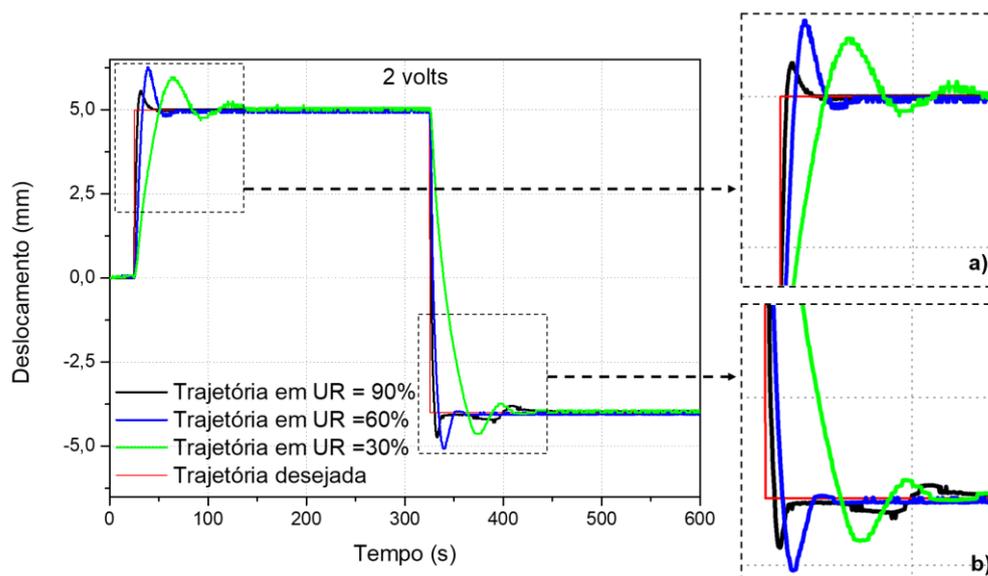


Figura 4.55 - Estabilidade do controlador em diferentes UR's para DDP = 2 volts; **a)** detalhe ajuste posição direita; **b)** detalhe no ajuste da posição esquerda.

Nesse ensaio, similar aos anteriores, as características das curvas de resposta foram muito influenciadas pela UR. No primeiro intervalo do ensaio, ao ajustar a posição da direita (ênfase na Figura 4.55.a), apesar das curvas serem mais lentas para serem estabilizadas, o sistema de controle mostrou-se eficiente ao estabilizar o atuador IPMC em relação à posição de ajuste. Em 90% de UR, a taxa de deslocamento médio foi de 14,2 mm/s em tempo de 3,5 segundos para atingir o valor ajustado. Para 60% de UR, o ajuste foi atingido em torno de 8,5 segundos apresentando taxa média de 5,8 mm/s. Em 30% de UR, a taxa de deslocamento médio foi de 1,9 mm/s atingindo o valor ajustado de posição próximo aos 26 segundos.

No segundo intervalo do ensaio (ênfase na Figura 4.55.b), ao ajustar a posição da esquerda, as curvas apresentaram comportamentos similares aos anteriores com o controlador demorando um tempo maior para estabilizar o

atuador. Em 90% de UR, o atuador percorreu os 9,0 mm em 5 segundos, apresentando uma taxa média de deslocamento de 18,0 mm/s. Já o ensaio de 60% de UR apresentou uma taxa de deslocamento de 9,4 mm/s, atingindo o ponto de ajuste em 9,5 segundos. E por fim, a curva de 30% de UR apresenta um comportamento lento em relação aos demais, com taxa de deslocamento de 2,33 mm/s e atingindo o ponto de ajuste em 38,5 segundos.

Em todos os ensaios realizados modificando a UR e a DDP o controlador se mostrou eficaz, conseguindo estabilizar o IPMC no ponto de ajuste. Apesar da eficiência do atuador, os intervalos de tempo e conseqüentemente as taxas de deslocamento foram distintas. Principalmente em UR baixa, como foi o caso do ensaio com UR = 30%, esse comportamento de lentidão já era esperado, já que a UR influencia diretamente na mobilidade iônica no interior dos canais ionoméricos do polímero e conseqüentemente no desempenho mecânico do atuador IPMC [3].

A Tabela 4.10, apresenta um apanhado geral dos resultados obtidos nos ensaios acima descritos, com o tempo de subida e sua respectiva taxa de deslocamento, além de apresentar a ocorrência de *overshoot*, relaxação reversa e o coeficiente de determinação (R^2).

Tabela 4.10 - Sumarização dos resultados do ensaio IPMC-Li

Contra-íon	UR (%)	DDP (v)	TS (s)	TE (s)	O (%)	TD (mm/s)	RR (sim/não)	R ² (%)
IPMC-Li (Dir)	90	+1	14,0	16,5	-	0,16	Não	99,4
		+1,5	5,0	9,5	7,0	0,86	Não	99,5
		+2	3,5	11,0	11,0	1,42	Não	99,5
	60	+1	16,0	22,0	-	0,14	Não	98,0
		+1,5	8,5	22,5	23,0	0,50	Não	98,7
		+2	8,5	22,5	25,0	0,58	Não	98,6
	30	+1	30,0	55,0	17,0	0,07	Não	98,9
		+1,5	21,0	36,5	11,0	0,20	Não	97,3
		+2	26,0	54,5	19,0	0,19	Não	96,8
IPMC-Li (Esq)	90	-1	18,0	14,0	8,0	0,28	Não	
		-1,5	5,0	23,0	13,0	1,20	Não	
		-2	5,0	11,0	8,0	1,80	Não	
	60	-1	22,0	28,0	-	0,23	Não	
		-1,5	14,5	28,0	7,5	0,41	Não	
		-2	9,5	23,0	12,0	0,94	Não	
	30	-1	37,0	45,0	-	0,14	Não	
		-1,5	42,5	60,0	-	0,18	Não	
		-2	38,5	60,0	7,0	0,23	Não	

TS = tempo de subida; TE = tempo de estabilização; O = overshoot; TD = taxa de deslocamento; RR = relaxação reversa.

Os resultados sumarizados ilustrados na tabela 4.10 nos apresentam valores interessantes para poder comparar a influência da UR no deslocamento do atuador durante o ensaio. O comparativo ideal deve ser realizado levando em consideração as DDP's e as amplitudes de deslocamento calculando a taxa de deslocamento. E, portanto, podemos concluir nesse ensaio que as taxas mais significativas são as provenientes dos ensaios onde a UR foi mais alta.

Ao avaliar as DDP's entre -1 a +1 volt, os resultados apresentaram uma razão próxima de 2x maior entre os ambientes mais úmidos em relação aos mais secos. Já ao avaliar a DDP = +1,5 volts, obteve-se um resultado próximo de 4x maior na taxa de deslocamento entre o ambiente mais úmido em relação ao mais seco. E ao avaliar a DDP= -1,5 volts, os resultados demonstraram uma razão ainda mais significativa próximo de 6x maior para a taxa de deslocamento entre

as UR's. Já para as DDP's entre -2 a +2 volts, os resultados apresentaram uma razão de até 7x maior entre o ambiente mais úmido para com o ambiente mais seco.

Além disso, pode-se observar que os tempos de estabilização do atuador na posição ajustada são menores em altas UR's e vão aumentando ao passo que a UR vai diminuindo. Esse resultado comprova que ambientes úmidos são mais propícios para a mobilidade iônica no interior do polímero, e assim, os mesmos respondem mais rapidamente ao estímulo elétrico fornecido pelo controlador.

Os resultados obtidos de *overshoot*, apresentaram variações não lineares em função das UR, esse resultado ilustra o comportamento não linear do atuador IPMC em resposta à ação de controle.

O fenômeno de relaxação reversa não foram observados em nenhum dos ensaios realizados. Caso tenha ocorrido, o sistema de controle compensou essa relaxação fornecendo mais energia até estabilizar o atuador na posição ajustada.

Já para o R^2 os resultados foram muito bons, todos apresentaram coeficiente superior a 95%, o que representa uma alta correlação entre a posição de ajuste e a posição do atuador. Como ele foi determinado em todo o tempo de ensaio, e assim compreendeu as tensões positivas e negativas, os resultados apresentados nas DDP's positivas expressam o ensaio todo.

As evidências encontradas nesses resultados vão ao encontro de trabalhos que avaliaram as propriedades eletromecânicas do atuador IPMC. Um exemplo dessas evidências foi relatada no trabalho de Nakshatharan et al. [97], onde no ensaio de deformação do atuador estimulado em 2 volts apresentaram que a 10% de umidade, o deslocamento foi de cerca de 3,5 mm e a 90% de umidade foi de 15 mm, apresentando uma variação aproximadamente 4,5 vezes, sendo um resultado bastante substancial.

Além desse, o trabalho de Shoji e Hirayama [33], apresentaram valores de deslocamento do IPMC de 0,3 mm e 3,5 mm em UR = 30% e 90% respectivamente, utilizaram DDP com intensidade +2 e -2 volts. Significando uma diferença nos deslocamentos de 10 vezes entre as UR's distintas. Nesse sentido,

pode atribuir o alto desempenho do IPMC-Li à grande camada de solvatação do íons e ao bom coeficiente de difusão [24].

A seção abaixo, apresenta a estabilidade do sistema de controle para o atuador com contra-íon trocado para: H^+ , Na^+ e K^+ .

4.6.3 Estabilidade do sistema de controle trocando o contra-íon

Com o objetivo de compreender a influência do tamanho/tipo de contra-íon no desempenho do controlador, realizou-se um ensaio alterando os contra-íons dopado na amostra de IPMC. Além do Li^+ já utilizado nos ensaios anteriores, novos contra-íons foram avaliados: H^+ , K^+ e Na^+ . Para a troca catiônica, utilizou-se o processo de impregnação detalhado na seção 3.3.2.

Utilizou-se a mesma amostra de IPMC dos ensaios anteriores, para não haver mudança da resistência elétrica dos eletrodos e assim comprometer a validade do ensaio. Os parâmetros e os seus respectivos valores (deslocamento e UR) utilizados nesse ensaio foram os mesmos utilizados anteriormente. Para a DDP, utilizou-se valores definidos em intervalos de -2 a +2 volts.

4.6.3.1 Estabilidade no sistema de controle com o contra-íon H^+

O primeiro ensaio realizado foi utilizando o contra-íon H^+ com variação de DDP, UR constante de 90% em função do tempo. O contra-íon H^+ é muito utilizado e discutido em IPMCs na literatura desses materiais devido ao seu mecanismo de difusão iônica. De acordo com estudos anteriores [176], [177], e conforme mencionando anteriormente, o movimento do IPMC é derivado prioritariamente por dois mecanismos de difusão iônica, a difusão estrutural e a veicular, que dependem do número de moléculas de água disponíveis. A difusão estrutural (ou Grotthuss) ocorre quando um pequeno contra-íon salta através da rede de ligação envolvendo H, movendo-se livremente. A difusão veicular ocorre quando o contra-íon solvatado é transportado pela rede. No caso do contra-íon H^+ , ele se difunde em ambos os mecanismos, o que leva a um movimento iônico

mais rápido e, conseqüentemente, o IPMC responde mais rapidamente ao estímulo elétrico externo.

Os outros contra-íons solvatados, por outro lado, tenderão a seguir o mecanismo de difusão veicular devido ao movimento conjunto de sua carga e centro de massa [47] que tornam mais lento a travessia dos canais ionoméricos e fazem a resposta do IPMC ao sistema elétrico estímulo mais lento. Portanto, o objetivo desse ensaio foi observar a resposta do IPMC frente a mudança de UR (90/60/30%) em DDP = 2 volts e sua estabilidade no decorrer do tempo. O ensaio foi realizado em períodos de 300 segundos para cada posição, conforme realizado com o Li^+ anteriormente.

A Figura 4.56 apresenta três gráficos, correspondendo ao comportamento do atuador frente a mudança de trajetória, DDP e corrente elétrica consumida em UR = 90%.

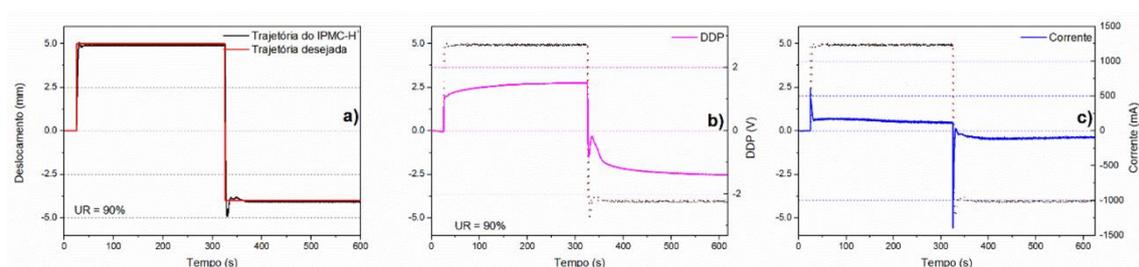


Figura 4.56 – Comportamento do IPMC sob ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-H em UR = 90%

Na Figura 4.56.a, é apresentado o resultado do ensaio com UR = 90%. A resposta do IPMC à mudança de trajetória - direita e esquerda - é rápida, em 5 e 3 segundos respectivamente apresentando um *overshoot* desprezível de aproximadamente 1,5%.

A segunda parte do ensaio (esquerda), apresenta um *overshoot* de aproximadamente 9,0% e o sistema de controle necessita de um tempo de aproximadamente 8,0 segundos para deixá-lo estável, seguindo assim até o final do ensaio. A hipótese que explica esse maior *overshoot* na transição para a segunda parte dos ensaios é o fato de percorrer uma maior distância pico a pico (posição direita até a esquerda) entre as trajetórias desejadas. Assim, quando a trajetória desejada e a trajetória do atuador estão próximas, o sistema de controle

tende a diminuir a intensidade da DDP apresentando um atraso para sintonizar as trajetórias.

Importante mencionar que não foi observado o fenômeno de relaxação reversa. Porém, quando o gráfico de resultados (Figura 4.56.b) é inspecionado, fica evidente uma subida e uma descida gradativa da DDP na primeira e segunda etapa do ensaio respectivamente, com finalidade de ajuste fino da trajetória.

Ao observar com atenção, pode-se concluir que houve relaxação reversa ao analisar as variações da DDP ao longo do ensaio. Isso comprova a eficiência do controlador desenvolvido, pois ele foi capaz de estabilizar a trajetória do IPMC contornando esse fenômeno indesejado.

Ao analisar o gráfico de corrente consumida (Figura 4.56.c), o mesmo apresenta picos quando há mudança significativa de trajetória, de 600 mA e -1400 mA respectivamente.

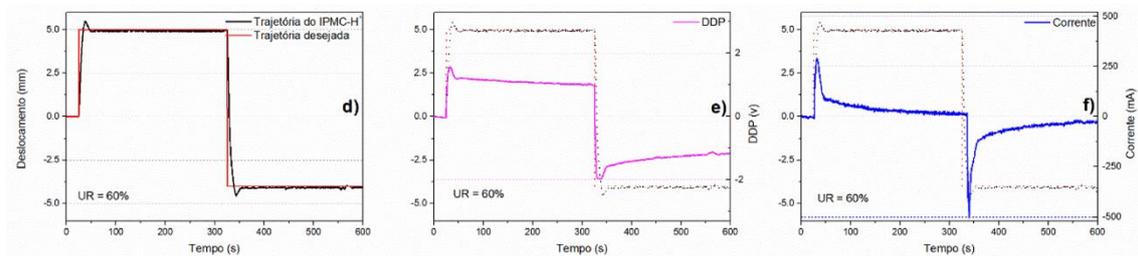


Figura 4.57 - Comportamento do IPMC sob ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-H em UR = 60%

Já os gráficos **d)** da Figura 4.57 e **g)** da Figura 4.58, em UR = 60 e 30% respectivamente, o que fica claro é a taxa de deslocamento médio do IPMC. A rapidez do movimento em UR = 60% é significativamente maior que a de 30%. Contudo, ao observar a DDP fornecida pelo sistema de controle para manter as trajetórias (**e)** e **h)**), ambas apresentaram comportamento similar. E ao contrário do ensaio de 90%, não se observou relaxação reversa, já que a DDP ao contrário de aumentar gradativamente após o pico, ela diminuiu.

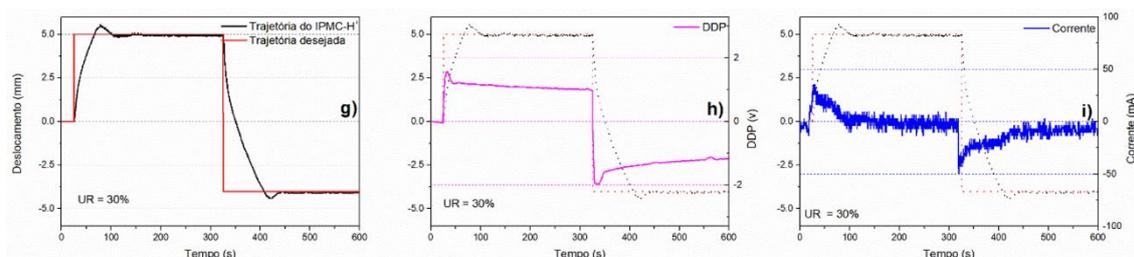


Figura 4.58 - Comportamento do IPMC sob ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-H em UR = 30%

Sobre os resultados obtidos nos gráficos **f)** e **i)**, observou-se picos de corrente quando houve mudança de trajetória. Esses picos foram mensurados em 300 mA e -500 mA para **f)** (UR = 60%) e 35 mA e -42mA para **i)** (UR = 30%).

Avaliando e comparando a corrente em função da UR, é possível notar que a corrente tem relação direta com a mobilidade catiônica no interior do material. Isto é, quanto maior a quantidade de moléculas de água, maior o pico de corrente. Por fim, após o ensaio com o IPMC-H o sistema de controle se portou bem, e quando solicitado, realizou o controle do atuador de forma eficaz.

A Tabela 4.11 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios em diferentes URs e DDP's para o IPMC-H. Os parâmetros avaliados foram, tempo de subida e de estabilização, *overshoot*, taxa de deslocamento médio, relaxação reversa, carga acumulada e coeficiente de determinação (R^2). Os valores dessa tabela foram coletados dos gráficos da Figura 4.56.

Tabela 4.11- Sumarização dos dados para IPMC-H

Contra- íon	DDP (V)	UR (%)	TS (s)	TE (s)	O (%)	TA (mm/s)	RR (Sim/Não)	CA (mC)	R ² (%)
IPMC-H (dir)	+2	90	4,0	5,0	*	1,25	Não	89,2	99,5
		60	8,0	17,0	9,0	0,625	Não	27,8	98,7
		30	37,0	66,0	4,7	0,135	Não	1,8	95,0
IPMC-H (esq)	-2	90	3,0	8,0	10,0	3,00	Não	-56,9	
		60	12,0	25,0	6,0	0,75	Não	-36,0	
		30	80,0	105,0	4,5	0,11	Não	-7,8	

TS = tempo de subida; TE = tempo de estabilização; O = overshoot; TD = taxa de deslocamento; RR = relaxação reversa; CA = carga acumulada

É possível visualizar a influência da UR nos parâmetros avaliados. Em 90%, percebe-se que o tempo de movimento direta/esquerda é o menor em relação às demais URs, sendo que isso já era esperado, se tratando de uma amostra mais “flexível” com um menor módulo de Young devido ao alto grau de hidratação [178].

Conseqüentemente as taxas de deslocamento em UR=90% também foram as maiores. Deve-se lembrar que a amostra muito hidratada, possui portadores de carga mais móveis, e maior diâmetro dos canais ionoméricos, facilitando assim a movimentação dos mesmos através da membrana polimérica.

Outro fator importante a mencionar, é o comportamento singular do IPMC-H é que em alta umidade, H^+ se move prioritariamente com o mecanismo de Grotthuss, enquanto os alcalinos se difundirão mais lentamente por meio da difusão veicular.

Ao avaliar a relaxação reversa, não se observou quando comparada a trajetória desejada para com a do IPMC em nenhuma das UR's. Porém, conforme já mencionado anteriormente, é possível identificar o fenômeno da relaxação avaliando a DDP.

A carga acumulada foi calculada como sendo a soma das cargas positivas necessárias para manter o IPMC na posição positiva (à direita) e cargas negativas (necessárias para manter na posição negativa (à esquerda) para cada UR avaliada. Na prática, o resultado dessa carga foi obtido pela integral da área sob a curva dos gráficos **c)**, **f)** e **i)** da Figura 4.566, 4.57 e 4.58 respectivamente. Em 90%, a carga total armazenada ao final do ensaio foi de 32,3 Coulomb. Para 60% o resultado foi de -8,2 Coulomb e para 30% foi de -6,0 Coulomb.

O coeficiente de determinação (R^2) apresentado na DDP positiva da tabela, conforme mencionando anteriormente, representa os valores do ensaio do ensaio todo (positivo + negativo). Assim, o mais significativo foi no ambiente com UR=90%, chegando a 99,5%. No geral, todas as UR's avaliadas apresentaram excelente correlação.

Ao final, conclui-se que o sistema de controle foi eficaz para as UR's avaliadas e conseguiu realizar sua principal tarefa que era controlar o atuador

IPMC. Algumas particularidades do contra-íon H^+ foram descritas durante os resultados, mas, mesmo com elas, o controlador conseguiu cumprir seu papel. Na próxima seção, a mesma sequência de ensaio foi realizada para o contra-íon Na^+ .

4.6.3.2 Estabilidade no sistema de controle com o contra-íon Na^+

O terceiro contra-íon trocado na amostra de IPMC para os ensaios de estabilidade do controlador foi o sódio (Na^+). O processo de impregnação do contra-íon na amostra de IPMC foi realizado seguindo os procedimentos descritos na seção 3.2.2. Posteriormente, a amostra foi colocada no suporte interno da caixa de acrílico, a UR foi ajustada conforme necessidade e a DDP no DAQ foi ajustada para o intervalo entre -2 a +2 volts. O ensaio seguiu os procedimentos já mencionados anteriormente. A Figura 4.59 apresenta o comportamento do atuador frente a mudança de trajetória, DDP e corrente elétrica em UR = 90%.

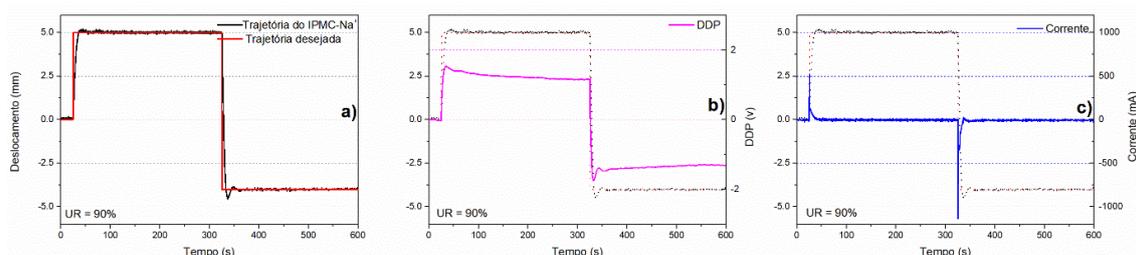


Figura 4.59 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-Na em UR = 90%

A Figura 4.59.a, apresenta o comportamento da trajetória do IPMC-Na e da trajetória desejada durante o ensaio com UR = 90%. Na primeira etapa do ensaio, o sistema demorou aproximadamente 10,0 segundos para ajustar o atuador na trajetória desejada, sem apresentar *overshoot*. Na segunda etapa do ensaio, ao inverter a trajetória desejada, o sistema de controle colocou o atuador na trajetória desejada em aproximadamente 8,0 segundos com um *overshoot*

próximo de 6,0%, depois desse período, o sistema de controle manteve a trajetória do atuador até o final do ensaio.

Observando a Figura 4.59.b é possível avaliar a DDP fornecida pelo sistema de controle para manter a trajetória, percebe-se que ao ajustar a trajetória, o sistema fornece uma DDP mais alta, depois desse pico (+1,53 volts e -1,75 volts), há uma leve diminuição e estabilização da DDP até o final do ensaio. Em nenhum momento apresentou sinais de relaxação reversa e saturação do sistema elétrico.

Na Figura 4.59.c, observa-se o comportamento da corrente elétrica consumida pelo atuador no decorrer do ensaio. O mesmo, apresenta características similares aos da DDP. Há picos significativos de corrente (520 mA e -1140 mA) nos momentos de transição de posição do atuador, porém, logo depois desses picos, a corrente se mantém quase constante até o final do ensaio. Ao final do ensaio com UR = 90%, o sistema de controle conseguiu ajustar a trajetória do IPMC conforme desejado e se portou bem até o final do ensaio.

A Figura 4.60 apresenta o comportamento do atuador frente a mudança de trajetória, DDP e corrente elétrica em UR = 60%.

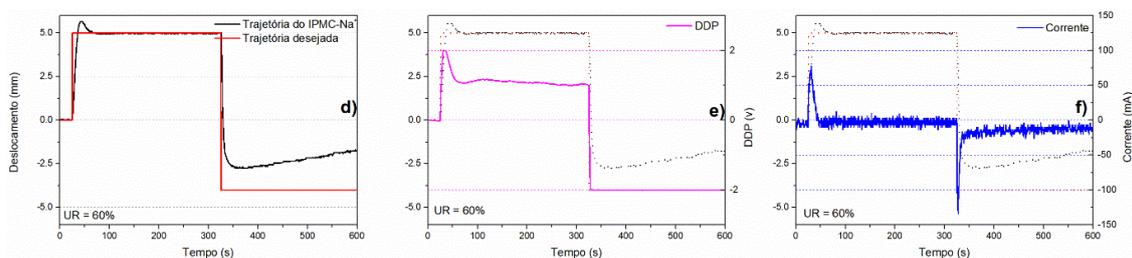


Figura 4.60 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-Na em UR = 60%

A Figura 4.60.d, apresenta o controle de trajetória em UR = 60%. Na etapa inicial do ensaio, após ajustar a trajetória desejada o sistema imediatamente fornece a DDP necessária e o IPMC atinge a mesma em 11,0 segundos, apresentando um *overshoot* próximo aos 13,0%. No entanto, próximo aos 28,0 segundos estabiliza a trajetória até o final da primeira etapa do ensaio. Na segunda etapa, ao inverter a posição desejada, o IPMC não consegue chegar

até a trajetória desejada, se aproximando o máximo da trajetória desejada no tempo de aproximadamente 353 segundos. Porém, depois desse tempo o IPMC começa a relaxar gradativamente até o final do ensaio.

Ao avaliar a Figura 4.60.e, que apresenta o comportamento da DDP no decorrer do ensaio. Na primeira etapa, pode-se analisar que apresenta um pico de tensão de +2 volts no mesmo instante de colocar o IPMC na trajetória desejada, logo depois disso, se estabiliza próximo a +1 volt até o final da primeira etapa. Na segunda etapa, ao inverter a trajetória desejada, o IPMC responde rapidamente a inversão de DDP fornecida pelo sistema de controle, porém, não consegue alcançar a trajetória desejada. Nesse momento, percebe-se uma saturação do sistema elétrico (-2 volts) perdurando até o final do ensaio. Com esse resultado, pode-se evidenciar que o sistema de controle executou bem seu papel na primeira etapa do ensaio, já na segunda, não conseguiu controlar o IPMC devido a fenômenos intrínsecos do mesmo, como a relaxação reversa e eletrólise. Uma hipótese que pode explicar esse comportamento é que, com o polímero menos hidratado, o gradiente de pressão interna provocado pela migração iônica não é suficiente para causar uma deformação volumétrica suficiente no atuador para que o mesmo alcance a trajetória desejada.

Essa constatação relaciona o grau de hidratação do polímero como o principal fator para esse fenômeno, pois como no ensaio com UR=90% provou ser capaz de efetuar essa deformação. Vários trabalhos na literatura também corroboram a evidência que a UR influencia o conteúdo de água no IPMC, e consequentemente o transporte de contra-íon, e, portanto, o seu desempenho mecânico [179], [180].

A Figura 4.60.f, apresenta a corrente elétrica consumida pelo IPMC no decorrer do ensaio. Há dois picos significativos no resultado, o primeiro positivo, quando o IPMC é ajustado na trajetória desejada com valor de pico de 77 mA e o segundo negativo, valor próximo aos -133 mA. Logo após o pico negativo a corrente não retorna para zero ou próximo a zero, isso significa que o IPMC ainda está consumindo corrente para permanecer na posição. Isso é respondido pela diferença de condutividade entre os eletrodos, o que ocasiona maior facilidade à

passagem de corrente em um dos eletrodos em detrimento do outro, já mencionado anteriormente e corroborado no ensaio quarto pontas.

A Figura 4.61 apresenta o comportamento do atuador frente a mudança de trajetória, DDP e corrente elétrica em UR = 30%.

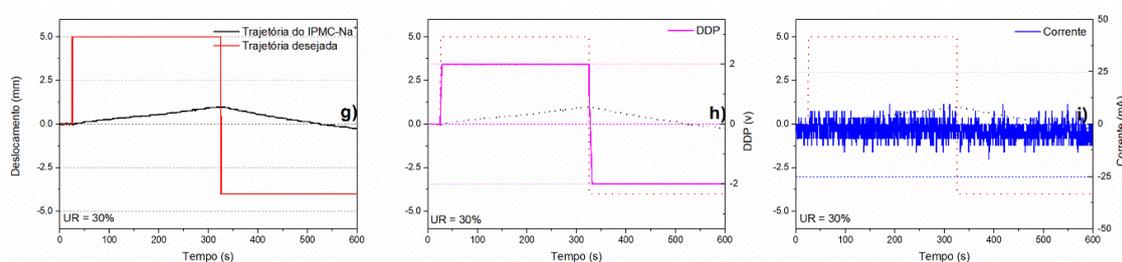


Figura 4.61 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-Na em UR = 30%

A Figura 4.61.g, ilustra o comportamento do deslocamento do IPMC frente à trajetória desejada durante o ensaio em UR = 30%. Nesse ensaio, o IPMC foi muito influenciado pela baixa UR, pode-se perceber que nessa condição, o mesmo apresentou dificuldades e lentidão para se movimentar, e assim, não foi possível alcançar a trajetória desejada em nenhum momento durante todo o ensaio. O movimento máximo do IPMC nesse ensaio foi de 0,97 mm em relação à 5,0 mm obtidos pelos contra-íons anteriores. Isso pode ter relação direta com o raio iônico ser aproximadamente 2x maior que os anteriormente avaliados.

Ao avaliar a DDP na Figura 4.61.h, fica clara a ação do controlador ao fornecer em todo momento do ensaio a DDP máxima ajustada no DAQ, e, mesmo assim, o IPMC apresentou movimento lento. Essa, foi além dos ensaios realizados anteriormente com outros contra-íons nessa mesma UR. O que evidencia que o Na^+ possui maior dificuldade de difusão através dos canais ioméricos por possuir raio iônico maior que os demais contra-íons.

Mais uma evidência é apresentada na Figura 4.61.i, apresentando a corrente elétrica consumida pelo atuador ao efetuar os deslocamentos exigidos, de aproximadamente 10 mA. Conforme apresenta a literatura, há uma relação entre os picos de tensão e de corrente consumida para com o contra-íon e transporte de água [154].

Um resumo dos dados obtidos no ensaio do IPMC-Na estão descritos na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Sumarização dos dados IPMC-Na

Contra- íon	DDP (V)	UR (%)	TS (s)	TE (s)	O (%)	TA (mm/s)	RR (Sim/Não)	CA (mC)	R ² (%)
IPMC-Na (dir)	+2	90	11,0	12,0	-	0,454	Não	0,77	99,0
		60	11,0	28,0	13,0	0,454	Não	0,06	98,0
		30	-	-	-	-	Não	-1,1	34,9
IPMC-Na (esq)	-2	90	8,0	15,0	6,0	1,125	Não	-6,6	
		60	-	-	-	-	Sim	-9,1	
		30	-	-	-	-	Não	-2,1	

TS = tempo de subida; TE = tempo de estabilização; O = overshoot; TD = taxa de deslocamento; RR = relaxação reversa; CA = carga acumulada.

Observa-se que a situação mais favorável para esse contra-íon foi utilizando-o em ambiente com alta UR e em DDP alta. Acredita-se que a resposta rápida esteja ligada ao pequeno raio do íon hidratado em relação ao tamanho do canal hidrofílico na membrana [181]. Já a UR que apresentou relaxação reversa foi atuando em 60%, e mesmo apresentando relaxação durante o ensaio, o coeficiente de determinação ficou alto em 98%.

Com relação ao acúmulo de carga durante o ensaio, ao integrar a curva da corrente por todo o tempo do ensaio chega-se aos seguintes valores, em 90% de UR, carga cumulada de -7,48 Coulomb. Em 60%, o valor foi de -9,41 Coulomb e em 30% foi -3,41 Coulomb. Essa alta corrente consumida em 60% de UR em relação à de 90% pode estar relacionada a relaxação reversa que aumentou o consumo da corrente elétrica já que a tensão esteve, na segunda parte do ensaio, totalmente saturada. Além disso, vale ressaltar, que conforme citado anteriormente, os eletrodos não possuem a mesma condutividade elétrica e isso faz com que em uma das direções de movimento a corrente consumida tenha que ser muito maior do que em outra.

Com o resumo dos resultados é possível evidenciar que o controlador desenvolvido neste trabalho realiza bem sua função, principalmente em ambientes com alta UR. A relaxação não apresentada no ambiente mais seco, em 30%, é devido a baixa quantidade de água contida na matriz polimérica, e

que, conforme a literatura [3], [24], [182], em ambientes secos, o fenômeno de relaxação não é observado. Porém, nesse tipo de condição, a mobilidade iônica é baixa e assim o atuador responde lentamente. Na próxima seção, novos ensaios foram realizados utilizando o contra-íon K^+ .

4.6.3.3 Estabilidade no sistema de controle com o contra-íon K^+

Nessa seção, os ensaios foram realizados com contra-íon K^+ . O processo de impregnação do contra-íon foi realizado seguindo os procedimentos descritos na seção 3.2.2. A amostra condicionada em UR controlada e a DDP foi ajustada no DAQ foi entre -2 a +2 volts. O ensaio seguiu os procedimentos já mencionados anteriormente e realizados para os demais contra-íons. O objetivo desse ensaio foi avaliar a eficiência do controlador frente a mudança URs com a utilização desse contra-íon.

A Figura 4.64 ilustram o resultado do deslocamento, DDP e corrente elétrica consumida em 90% de UR durante os ensaios.

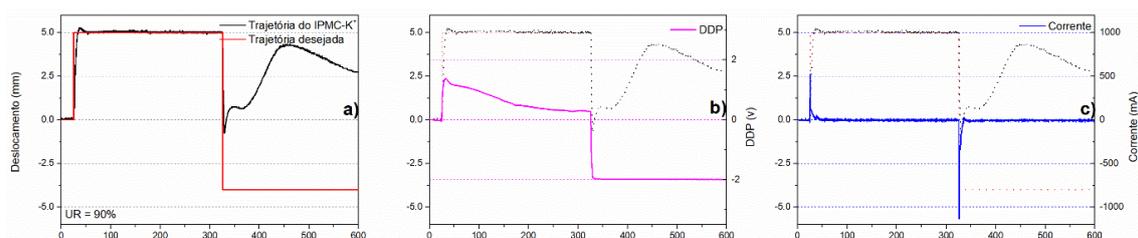


Figura 4.62 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-K em UR = 90%.

No gráfico **a)** da Figura 4.64, é ilustrado o comportamento da trajetória do IPMC em relação à trajetória desejada em UR = 90%. Após o valor da trajetória ser ajustado, o tempo de subida necessário para o sistema de controle colocar o IPMC na trajetória desejada foi de aproximadamente 8,0 segundos, apresentando um *overshoot* de 5,0%.

Assim, após esse período, o sistema manteve a trajetória ajustada até o final da primeira parte do ensaio. A DDP fornecida pelo sistema e necessária para realizar essa ação foi de aproximadamente 1,38 volts por um período de

aproximadamente 5,0 segundos, após isso, a DDP foi sendo ajustada pelo controlador para manter o atuador na trajetória desejada, conforme ilustrado no gráfico **b)** da Figura 4.64. A corrente elétrica consumida, apresentada no gráfico **c)** apresentou um pequeno pico de 520 mA no momento do deslocamento do atuador, logo após se manteve constante.

Na segunda etapa do ensaio, ao inverter a trajetória desejada, o IPMC iniciou seu deslocamento inverso por um período de aproximadamente 7,0 segundos, logo após, começou a relaxar. Mesmo o sistema de controle mantendo a DDP saturada em +2 volts pelo restante do ensaio, não foi possível manter a trajetória do IPMC, essa saturação da DDP é vista no gráfico **b)** da Figura 4.64. Com relação à corrente elétrica consumida, a mesma apresentou um pico de corrente no momento da mudança da trajetória de -1140 mA, após isso, foi aumentando gradativamente e estabilizou até o final do ensaio (ilustrado no gráfico **c)** da Figura 4.64). O fato interessante nessa avaliação com UR = 90%, é que, similar ao IPMC-Na, o fenômeno de relaxação reversa é observado somente na segunda etapa do ensaio.

A Figura 4.64 ilustram o resultado do deslocamento, DDP e corrente elétrica consumida em 60% de UR durante os ensaios.

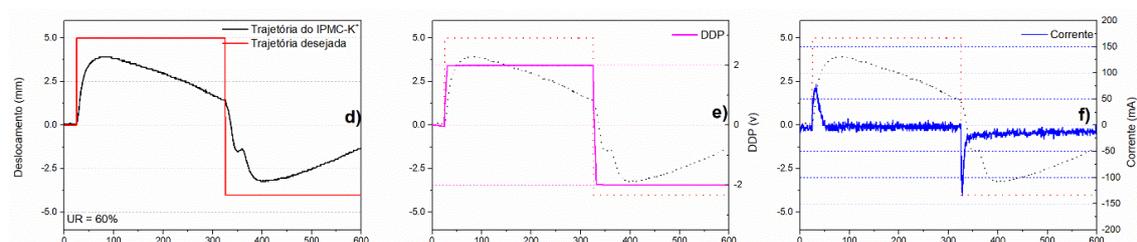


Figura 4.63 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-K em UR = 60%

Já no gráfico **d), e), f)** são apresentados os resultados do ensaio com UR = 60% em função do tempo. Inicialmente, ao ser selecionada a trajetória desejada no sistema, imediatamente o atuador se desloca naquele sentido. Porém, após alguns segundos, começa a perder desempenho, e, mesmo com a DDP saturada em +2 volts – ilustrado no gráfico **e)** - não foi possível alcançar a trajetória desejada. Isso pode ter ocorrido mais significativamente nesse ensaio,

pois o K^+ possui o maior raio iônico dentre os contra-íons avaliados, e esse, dentre outros fatores, dificultou a difusão do contra-íons através dos canais ionoméricos. Enquanto a corrente consumida – apresentada no gráfico **f)** – apresenta picos de 70 e -135 mA respectivamente nas mudanças de trajetória. Importante mencionar que, na segunda etapa do ensaio, a corrente consumida foi superior à da primeira etapa, devido às diferentes características elétricas dos eletrodos, e isto, pode ter resultado em um consumo de corrente excessivo pelo atuador.

A Figura 4.64 ilustram o resultado do deslocamento, DDP e corrente elétrica consumida em 30% de UR durante os ensaios.

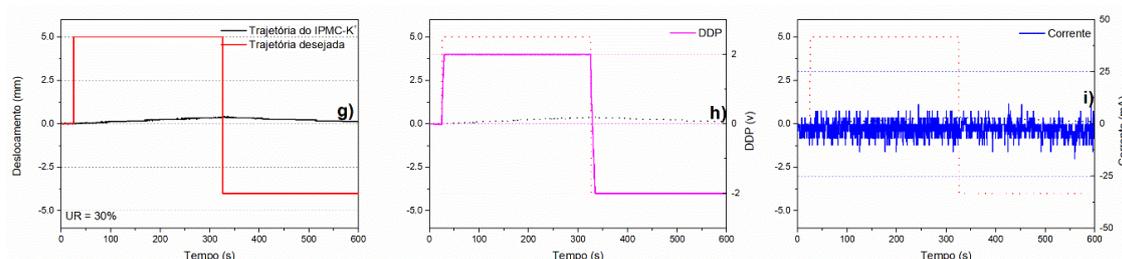


Figura 4.64 - Ação do sistema de controle no ensaio de Estabilidade do IPMC-K em UR = 30%

Os gráficos **g)**, **h)**, **i)** contidos na Figura 4.64, ilustram a estabilidade do atuador IPMC-K em UR = 30%. Como esperado, o atuador apresenta lentidão nos movimentos e mesmo com saturação da DDP por todo o ensaio, a migração iônica é lenta, e o resultado da movimentação não é bom. A corrente consumida durante o ensaio é insignificante em comparação às UR anteriores, houve uma redução média de 15x em relação a UR de 60% e de 118x em relação à 90% de UR. Esse resultado respalda a importância da UR no comportamento do atuador.

Por fim, um resumo dos dados obtidos no ensaio do IPMC-K apresentando os dados de DDP, UR, tempo de subida e estabilização, *overshoot*, taxa de deslocamento, relaxação reversa, carga acumulada e R^2 são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Sumarização dos dados do IPMC-K

Contra- íon	DDP (V)	UR (%)	TS (s)	TE (s)	O (%)	TA (mm/s)	RR (Sim/Não)	CA (mC)	R ² (%)
IPMC-K (dir)	+2	90	10,0	14,5	5,5	0,50	Não	0,95	74,5
		60	-	-	-	-	Sim	0,47	94,2
		30	-	-	-	-	Sim	-1,19	15,2
IPMC-K (esq)	-2	90	-	-	-	-	Sim	-7,23	74,5
		60	-	-	-	-	Sim	-9,60	94,2
		30	-	-	-	-	Sim	-1,40	15,2

TS = tempo de subida; TE = tempo de estabilização; O = overshoot; TD = taxa de deslocamento; RR = relaxação reversa; CA = carga acumulada

Ao analisar os dados da Tabela 4.13, é possível observar que não foram obtidos bons resultados com contra-íon K⁺. O coeficiente de determinação calculado para a UR = 60% foi alto significando que a relação entre as variáveis dependente e independente foi alto, no entanto, isso não se refletiu no controle do atuador. Com relação às demais variáveis, não foi possível avaliá-las, pois não foi possível controlar efetivamente o IPMC.

Os resultados alcançados nos ensaios com o IPMC-K são similares aos obtidos no ensaio com o Na⁺, ambos apresentam um deslocamento mais lento quando observado a taxa de deslocamento, além de apresentar mais problemas com a relaxação. Portanto, corroborando com a literatura [183], as propriedades de transdução do IPMC, vinculadas ao transporte dos íons móveis como deslocamento, taxa de deslocamento e grau de relaxação são diretamente afetadas pelas propriedades de íons móveis, como diâmetro de íons, diâmetro de íons hidratado, número de carga e mobilidade de íons.

Com relação à carga acumulada durante o ensaio, em 90% de UR a carga foi de -7,41 Coulomb, em 60% = -9,44 Coulomb e em 30% foi de -2,72 Coulomb.

Por fim, é apresentado uma tabela com o resumo de todos os dados dos contra-íons avaliados acima e com isso é possível fazer uma avaliação geral das características dos mesmos quando utilizados em um atuador IPMC. Os parâmetros utilizados na tabela foram os discutidos no início desta seção e são comumente utilizados como estimativas para projetar de controladores atendendo às especificações no domínio do tempo [184].

A Tabela 4.14 abaixo, apresenta os resultados sumarizados dos ensaios de estabilidade com os diversos contra-íons.

Tabela 4.14 – Dados sumarizados do ensaio realizados com todos os contra-íons

Contra-íon	DDP (v)	UR (%)	TS (s)	TE (s)	TM (s)	O (%)	(R²) (%)
IPMC-Li+	2	90	3,5	11,5	-	11,0	99,5
		60	7,5	23,5	-	25,0	98,6
		30	23,0	54,5	-	19,0	96,8
IPMC-H+	2	90	4,0	5,0	-	2,0	99,5
		60	8,0	18,0	-	9,5	98,7
		30	37,0	66,0	-	11,0	95,0
IPMC-Na+	2	90	9,0	17,0	-	4,0	99,0
		60	10,0	28,5	-	13,0	98,0
		30	-	-	-	-	34,9
IPMC-K+	2	90	10,0	14,5	-	5,5	74,5
		60	-	-	-	-	94,2
		30	-	-	-	-	15,2

TS = tempo de subida; TE = tempo de estabilização; TM = tempo morto; O = overshoot

Após todas as análises de estabilidade realizadas e descritas na tabela acima, é possível observar a influência da UR e do contra-íon no comportamento do sistema de controle. Na maioria dos casos avaliados, o controlador mostrou-se eficiente para controlar o IPMC. Algumas situações em particular como, a do contra-íon Na⁺ e K⁺ em ambientes mais secos, não foi possível controlar o IPMC, devido a grande dificuldade que o mesmo apresentou na movimentação. Essa dificuldade foi resultado da soma da UR com o contra-íon utilizado no atuador IPMC. Com esses resultados é possível inferir que para controlar IPMC utilizando o sistema de controle desenvolvido neste trabalho em ambientes úmidos, pode-se utilizar qualquer um dos contra-íons estudados. Porém, conforme o ambiente vai ficando mais seco, deve-se observar o tamanho do contra-íon e a forma em que o mesmo se difunde através da membrana polimérica para conseguir controlá-lo de maneira satisfatória.

A seguir, é apresentado um conjunto de ensaios que avaliaram a performance do sistema de controle frente a mudanças de UR e contra-íon.

4.7 Análise na Performance do Controlador PI

Como forma de avaliar o desempenho do controlador PI desenvolvido ao longo do tempo, um ensaio de performance foi planejado. Esse ensaio consiste em avaliar o desempenho do controlador frente às mudanças cíclicas de trajetória ao longo do tempo. Para isso, foi desenvolvido em Labview, uma máquina de estados (com dois estados) no sistema de controle, com trajetória positiva (direita) e negativa (esquerda). Uma máquina de estados é a representação de uma máquina abstrata que deve estar em um de um número finito de estados [25]. Nesse caso, a máquina de estados teve por objetivo realizar tarefas repetitivas de troca de posição em tempo pré-determinado, e com isso, o sistema tinha autonomia de se automodificar no tempo sem a necessidade da presença de um usuário. O tempo total do ensaio foi determinado arbitrariamente em 4200 segundos, com alterações da trajetória a cada 300 segundos. Esses valores foram definidos após análise preliminar da troca de posição em ambientes com UR e DDP distintas.

Além disso, alguns parâmetros foram avaliados para se determinar a performance do controlador, dentre eles: modificações da UR em que o atuador estava inserido e contra-íon incorporado.

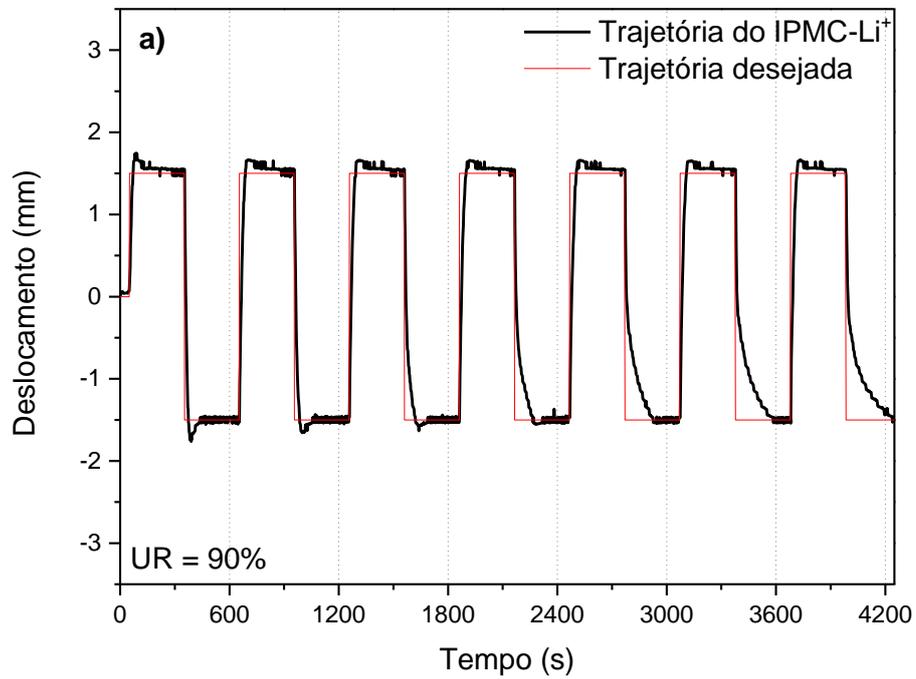
4.7.1 Performance do sistema de controle para o atuador IPMC-Li

Conforme já mencionado anteriormente, o desempenho mecânico do atuador é altamente dependente do ambiente operacional UR (nível de hidratação da membrana) [52]. Portanto, a fim de avaliar a capacidade de controlar e caracterizar IPMC em diferentes condições operacionais, as amostras foram condicionadas e testadas em UR de 30, 60 e 90% com os contra-íons Li^+ .

4.7.1.1 Performance do sistema de controle em diferentes UR's

Como primeiro ensaio, optou-se por avaliar a influência da UR na performance do controlador ao longo do tempo. O parâmetro avaliado foi

variação na UR em DDP de -1 a +1 volt. Nesse cenário os deslocamentos máximos definidos foram: -1,5 mm até +1,5 mm a partir do ponto inicial do atuador IPMC. A Figura 4.65 abaixo, ilustra os ensaios realizados.



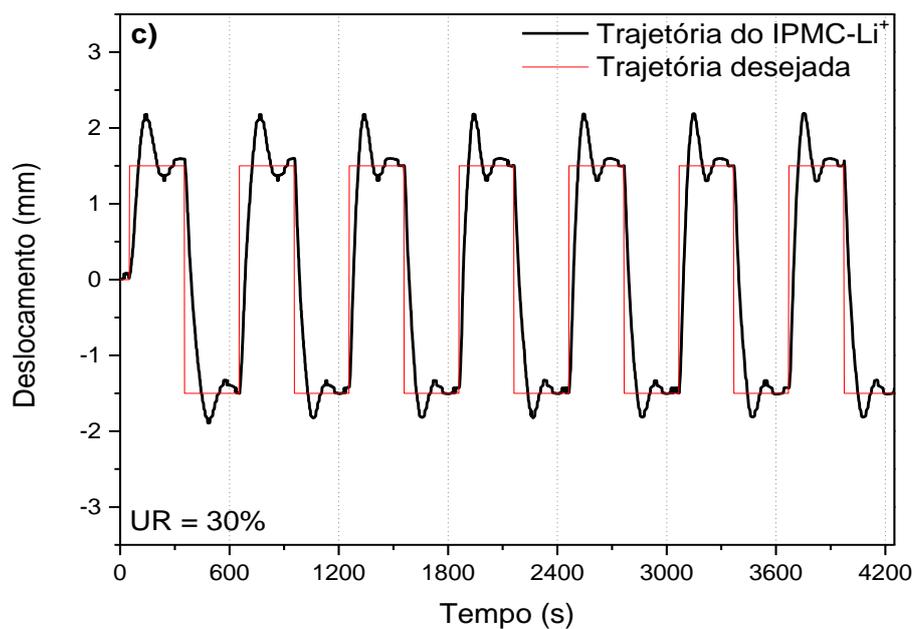
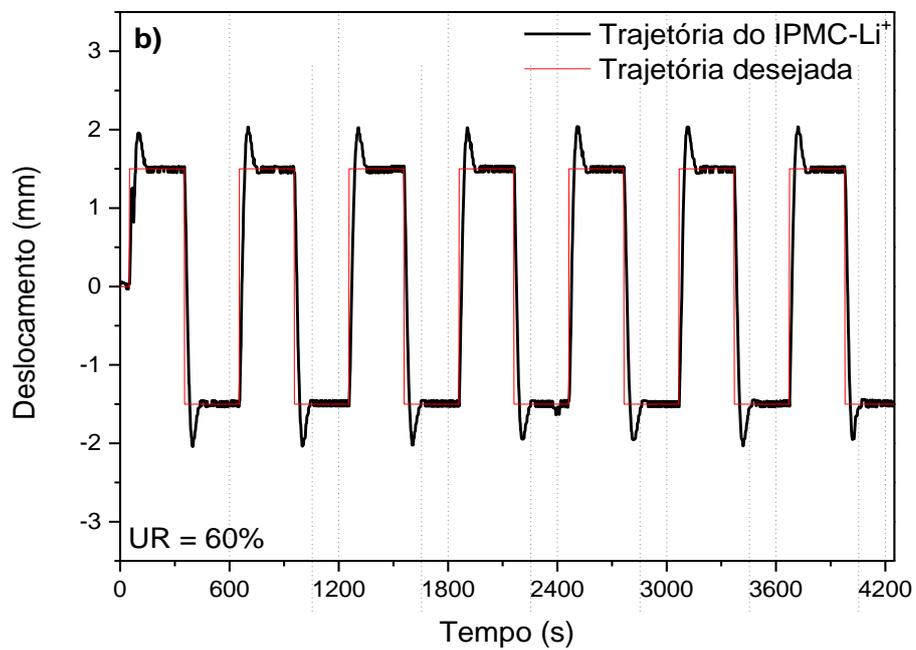


Figura 4.65 – Deslocamento do atuador sob ação de controle no ensaio de performance; **a)** = 90%/ **b)** = 60%; **c)** = 30%.

A performance foi avaliada comparando o tempo do segundo e o sétimo ciclo completo do atuador. Essa relação entre os ciclos representa a perda de desempenho no tempo. Além disso, esse movimento completo compreende um intervalo de 3 mm, 1,5 mm para cada direção, por esse motivo, o primeiro movimento foi desconsiderado, já que era de 1,5 mm somente. Abaixo, a Tabela 4.15 apresenta os dados do atuador IPMC-Li obtidos durante o ensaio de performance.

Tabela 4.15 - Perda de performance IPMC-Li

Contra-íon	DDP (V)	UR (%)	T-2 (s)	T-7 (s)	PD (%)
IPMC-Li ⁺ (dir)	+1	90	29,0	32,0	9,3%
		60	29,0	30,0	3,3%
		30	66,0	70,0	5,7%
IPMC-Li ⁺ (esq)	-1	90	27,0	198,0	86,3%
		60	29,0	29,0	-
		30	70,0	72,0	2,7%

T-2 = tempo 2º ciclo; T-7 = tempo 7º ciclo; PD = perda de desempenho

Conforme exibido na Figura 4.65.a, é possível perceber que a máquina de estados é iniciada após 50 segundos. E assim, ajusta a primeira trajetória para o atuador, imediatamente o sistema de controle envia o estímulo elétrico para o atuador IPMC não apresentando tempo morto; logo em seguida o tempo de subida registrado foi de aproximadamente 18,0 segundos, atingindo a trajetória desejada próximo dos 22,0 segundos com taxa de deslocamento médio de 0,075 mm/s, além de apresentar um percentual de *overshoot* de aproximadamente 16,0% com tempo para estabilização de 74,0 segundos. Porém, para fazer uma análise mais criteriosa do desempenho, avaliou-se o tempo do segundo ciclo completo para a posição direita/esquerda do atuador em relação ao sétimo ciclo completo – pois assim, o valor de deslocamento será o igual possibilitando a comparação dos tempos e taxas de deslocamento. Assim, o segundo ciclo (direita) apresentou os seguintes dados: tempo de subida de aproximadamente 29,0 segundos, enquanto o tempo necessário para chegar à posição de ajuste foi de aproximadamente 35,0 segundos em taxa de deslocamento de

aproximadamente 0,085 mm/s, com um *overshoot* próximos a 5% com tempo de estabilização em torno de 100,0 segundos.

Já para o sétimo ciclo (direita), apresentou os seguintes resultados: tempo de subida de aproximadamente 32,0 segundos, enquanto o tempo para a posição de ajuste foi de 39,0 segundos em taxa de deslocamento de 0,076 mm/s, apresentando um *overshoot* de 5,5% com tempo de estabilização de 178,0 segundos. Nesse cenário pode-se analisar uma perda de desempenho do atuador comparando os tempos dos ciclos (direita). Se no segundo ciclo o tempo necessário para o sistema de controle colocar o atuador na trajetória desejada foi de 29,0 segundos e na sétima foi de 32,0 já é uma evidência de perda de desempenho próximas aos 10,0%.

Além disso outra variável que apresenta uma diferença significativa é o tempo de estabilização, com um aumento de 78,0% em um período de 3600 segundos.

Os resultados observados do tempo do segundo ciclo (esquerda) foram os seguintes: tempo de descida de 27,0 segundos atingindo a trajetória desejada em 31,0 segundos em taxa de deslocamento de 0,096 mm/s, apresentando um *overshoot* de aproximadamente 5,0% com tempo de estabilização de 61,0 segundos. No entanto para o sétimo ciclo (esquerda), o tempo de descida 198,0 segundos atingindo o valor de deslocamento ajustado em 280,0 segundos em taxa de deslocamento de 0,0107 mm/s, não apresentando *overshoot* não apresentando tempo de estabilização. A comparação entre o resultado do tempo de descida do segundo para com o sétimo ciclo é bastante significativo, próximo a 10 vezes, de 27,0 segundos para 198,0 segundos, além do tempo para atingir a trajetória desejada de 31,0 segundos para 280,0 segundos, sendo assim, a taxa segue as mesmas ordens de grandeza de 0,096mm/s para 0,0107.

Na Figura 4.65.b, um ensaio similar foi realizado, porém, com UR = 60%. Todos os demais parâmetros foram mantidos idênticos aos do ensaio anterior. Assim, nesse ensaio também foram comparados o tempo do segundo e sétimo ciclo para as posições direita e esquerda. Para tal, no segundo ciclo (direita) houve um tempo de subida de 29,0 segundos atingindo a trajetória desejada em 30,0 segundos com taxa de deslocamento próxima dos 0,10 mm/s. Além disso,

apresentou um *overshoot* de 17,5%, com tempo de estabilização de 84,0 segundos. Já o sétimo ciclo(direita) apresentou resultados de tempo de subida de 30,0 segundos e para atingir a trajetória desejada de 32,0 segundos. Apresentou uma taxa de deslocamento de 0,093 mm/s, com *overshoot* de 17,75% e 83,0 segundos de tempo necessário para estabilização.

Com relação aos tempos do movimento da esquerda, o segundo ciclo (descida) foi de 29,0 segundos atingindo a trajetória desejada em 32,0 segundos com taxa de deslocamento de 0,093 mm/s. O *overshoot* registrado foi de 18,0% e com tempo de estabilização de 80,0 segundos. O tempo de descida necessário para o sétimo ciclo (descida) foi de 29,0 segundos e o tempo para atingir a trajetória desejada foi de 31,0 segundos com taxa de deslocamento de 0,096mm/s. O *overshoot* apresentado nessa etapa do ensaio foi de 15,0% com tempo total de estabilização de 72,0 segundos.

A Figura 4.65.c exibe os resultados obtidos no ensaio realizado com UR = 30%. É possível observar os tempos característicos e as curvas da trajetória do atuador em relação à desejada. O segundo ciclo (direita) apresenta um tempo de subida de 66 segundos e atingiu a trajetória desejada aos 71,0 segundos em uma taxa de deslocamento de 0,042 mm/s. Um *overshoot* significativo de 22,5% foi registrado e não alcançando tempo de estabilização dentro do limite de 5,0%. O sétimo ciclo (direita), apresentou tempo de subida de 70,0 segundos, atingindo a trajetória desejada aos 74,0 segundos. Isso significa que houve uma taxa de deslocamento de 0,055 mm/s com um *overshoot* de 23,0% e não obtendo tempo de estabilização no limite definido.

Para os valores de tempos de subida para as posições da esquerda, o segundo ciclo (esquerda) apresentou um tempo de subida de 70,0 segundos, atingindo a trajetória desejada em 75,0 segundos numa taxa de 0,04 mm/s. Apresentou um *overshoot* de 11,0% sem apresentar tempo de estabilização do atuador. No sétimo ciclo (esquerda), o tempo de subida foi de 72,0 segundos e atingiu a trajetória desejada aos 78,0 segundos, numa taxa de 0,038 mm/s com *overshoot* de 10,5% sem tempo para estabilização do atuador na posição ajustada.

As comparações relacionadas aos deslocamentos até atingir a trajetória desejada sobre os dados coletados no ensaio foram de 71,0 para 54,0 segundos, do segundo para o sétimo ciclo (direita) respectivamente, aparentando um ganho de performance de 24,0%. Com relação aos ciclos (esquerda), os tempos para atingir a trajetória desejada foram de 75,0 para 78,0 segundos, apresentando uma pequena perda de desempenho de 4,0%.

Os resultados apresentados na Tabela 4.15, resumem os resultados gerais e é possível identificar uma perda de performance significativa em UR = 90% principalmente no movimento do ciclo (esquerda). Isso pode significar que a amostra tem maior facilidade de movimento em um sentido (direita), em contrapartida, maior dificuldade em outro (esquerda). Isso pode ser explicado pela diferença de condutividade elétrica dos eletrodos, já que no processo de deposição não é possível controlar a quantidade de platina depositada em cada face do eletrodo. Além disso, com uma camada de platina diferente de outra, há influência mecânica e isso pode ter contribuído para uma direção ser mais favorecida que outra.

Outro fator contribuinte é que com o movimento cíclico a amostra pode ter sofrido maior dano de fratura na superfície do eletrodo e evaporação natural do solvente e assim, perdendo performance ao longo do tempo do ensaio. Assim como em estudo realizado anteriormente [52] avaliando a performance eletromecânica do atuador em movimentos cíclicos, o IPMC, tende a perder mais performance ao longo do tempo em UR mais alta.

Em UR = 60% o atuador perdeu menos performance ao longo do tempo, isto é, as diferenças entre o segundo e sétimo ciclo (direta/esquerda) foram as menores. Os resultados em UR = 30% também não apresentaram perdas muito significativas. Obviamente, uma análise mais criteriosa em um período mais longo seria necessária para corroborar tais evidências, conforme realizado em outro trabalho do grupo de pesquisa [3]. Porém, como inicialmente o objetivo deste ensaio foi avaliar a performance do controlador desenvolvido e não da amostra do compósito obtida já foi o suficiente.

Por fim, a performance do sistema de controle desenvolvido neste trabalho apresentou boa resposta ao estímulo elétrico, mesmo em ambientes

mais secos, - o que dificulta a migração iônica através da membrana polimérica - o controlador se mostrou eficaz ao ajustar a trajetória desejada do IPMC no menor tempo possível. Isso significa que o controlador atendeu aos objetivos almejados no início do ensaio.

4.7.1.2 Resposta elétrica do sistema de controle para o atuador IPMC-Li

Abaixo é apresentada a Figura 4.66 com os dados do ensaio da resposta do atuador IPMC-Li.

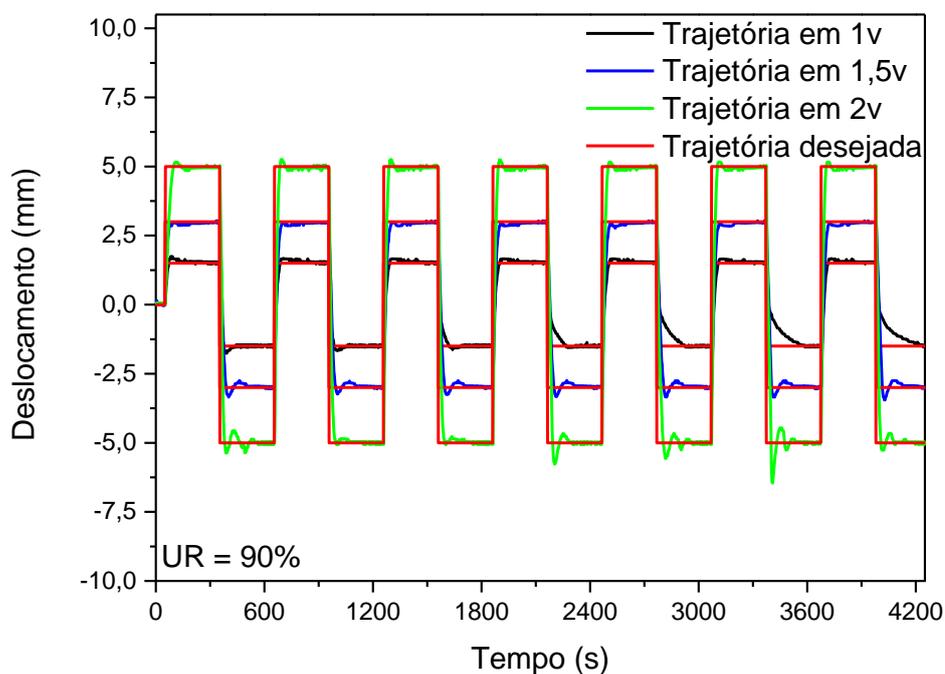


Figura 4.66 - Resposta do atuador IPMC-Li frente a variações da DDP

Ao observar o gráfico da Figura 4.66, que nas três DDP's avaliadas o controlador conseguiu ajustar a posição com eficiência. As situações que mais chamam atenção avaliando o gráfico é o comportamento do atuador quando utiliza -2 a +2 volts, onde as taxas de deslocamento são as maiores juntamente com um *overshoot* bastante pronunciado (aproximadamente 12,0% na direita e

9,5% na esquerda), com nenhuma perda de desempenho aparente do início ao fim do ensaio.

Na DDP de -1,5 a +1,5 volts ocorre um *overshoot* menos pronunciado (aproximadamente 6,0% direita e aproximadamente 8,5% esquerda) com taxa de deslocamento similar ao anterior e não perde desempenho aparentemente. Já na DDP de -1 a +1 volt é observada uma clara perda de desempenho no decorrer do tempo, apresentando o menor *overshoot* (aproximadamente 5,5% direita e 8,0% esquerda). No geral, o controlador foi eficaz e os detalhes das condições individualmente avaliadas são discutidos e ilustradas abaixo na Figura 4.67, Figura 4.68 e Figura 4.70 que apresentam a variação da DDP no eixo y secundário.

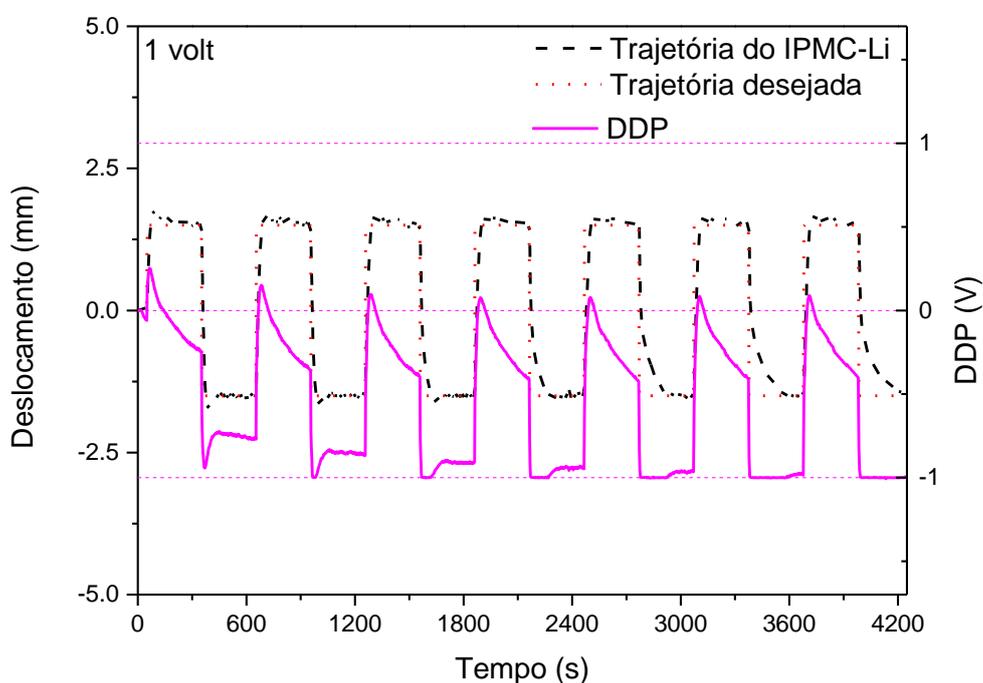


Figura 4.67 - Resposta do atuador IPMC-Li na DDP = 1 volt

A Figura 4.67 exhibe o resultado da DDP de -1 a +1 volt em função do tempo. É possível observar características bem distintas para com a DDP positiva em relação à negativa. A DDP positiva utilizada no segundo ciclo (direita) para manter a trajetória desejada é de máximo 0,15 volts (682 segundos),

enquanto, no sétimo ciclo (direita) foi de 0,09 volts (3710 segundos). Em contrapartida a DDP de pico negativa aplicada no segundo ciclo (esquerda) é de -0,94 volts (368 segundos) não chegando ao ponto de saturação (-1 volt). No sétimo ciclo (esquerda), a DDP necessária para manter a trajetória desejada foi de -1 volt (tempo de saturação = 293 segundos). É visível um aumento gradativo na DDP aplicada negativamente pelo controlador para manter o atuador na trajetória desejada.

Duas hipóteses podem explicar esse comportamento do IPMC. A primeira e já discutida anteriormente é de natureza eletromecânica, o fato de uma das faces do IPMC possuir eletrodo com diferente resistência à passagem de corrente elétrica em relação à outra, resulta em diferentes DDP's necessária para manter a posição em ambos os sentidos, somando-se a isso há evaporação natural do solvente do atuador durante o ensaio.

Uma outra hipótese de natureza eletroquímica, evidenciada por Levitsky e seus colegas [185] é que o processo de atuação do IPMC leva a uma assimetria nas propriedades eletroquímicas das interfaces catódica e anódica. Isso resulta em diferentes propriedades eletroquímicas do atuador.

Na Figura 4.68 abaixo, é ilustrado o ensaio realizado com DDP de -1,5 e +1,5 volts. O ensaio seguiu os mesmos parâmetros utilizados no ensaio anterior.

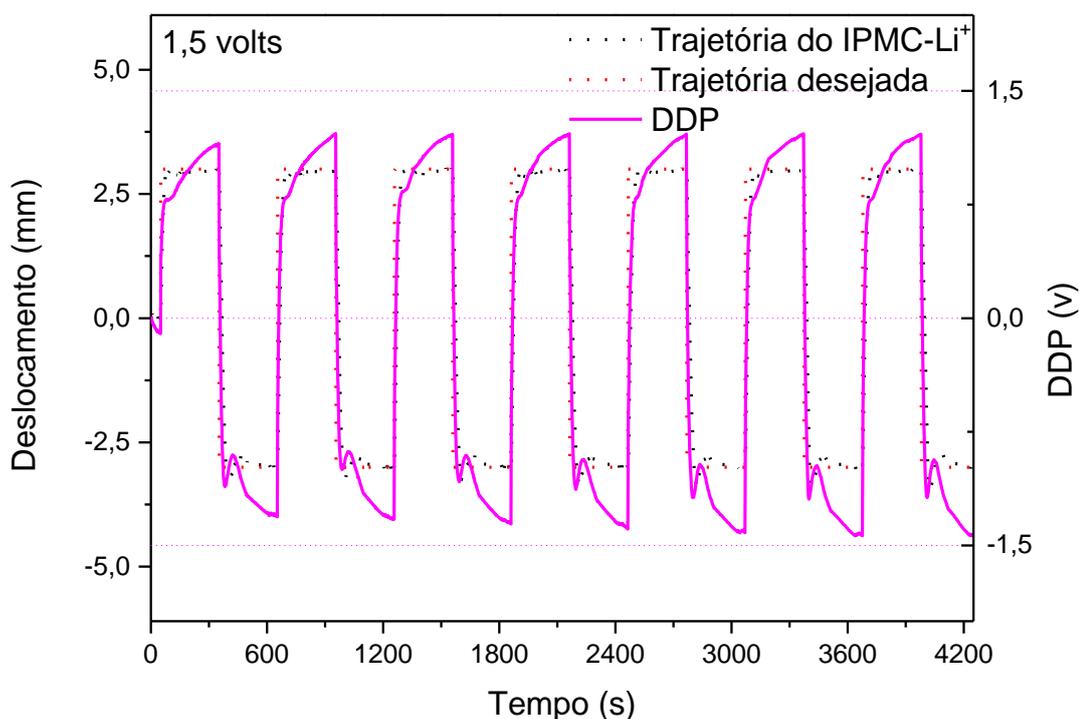


Figura 4.68 - Resposta do atuador IPMC-Li na DDP = 1,5 volts

Na Figura 4.68 é possível visualizar o comportamento da DDP para o controle de trajetória do IPMC. Nele, fica evidente o comportamento da DDP conforme o ajuste da trajetória era efetuado.

Em nenhum momento do ensaio, houve saturação elétrica do DAQ, isto significa, que em nenhum momento a DDP chegou ao limite de tensão ajustado. Assim, é possível identificar uma DDP quase constante até o final do ensaio, em contrapartida, foi observada uma característica distinta na DDP negativa, a mesma apresenta um pico de DDP (para ajustar a posição do IPMC) e logo após a DDP diminui de intensidade, em seguida, volta a aumentar até um ponto onde o atuador mantém a trajetória em um estado estacionário. Para fazer uma análise mais criteriosa, os valores dos picos das DDP's foram medidos e ilustrados para tentar explicar esse comportamento distinto.

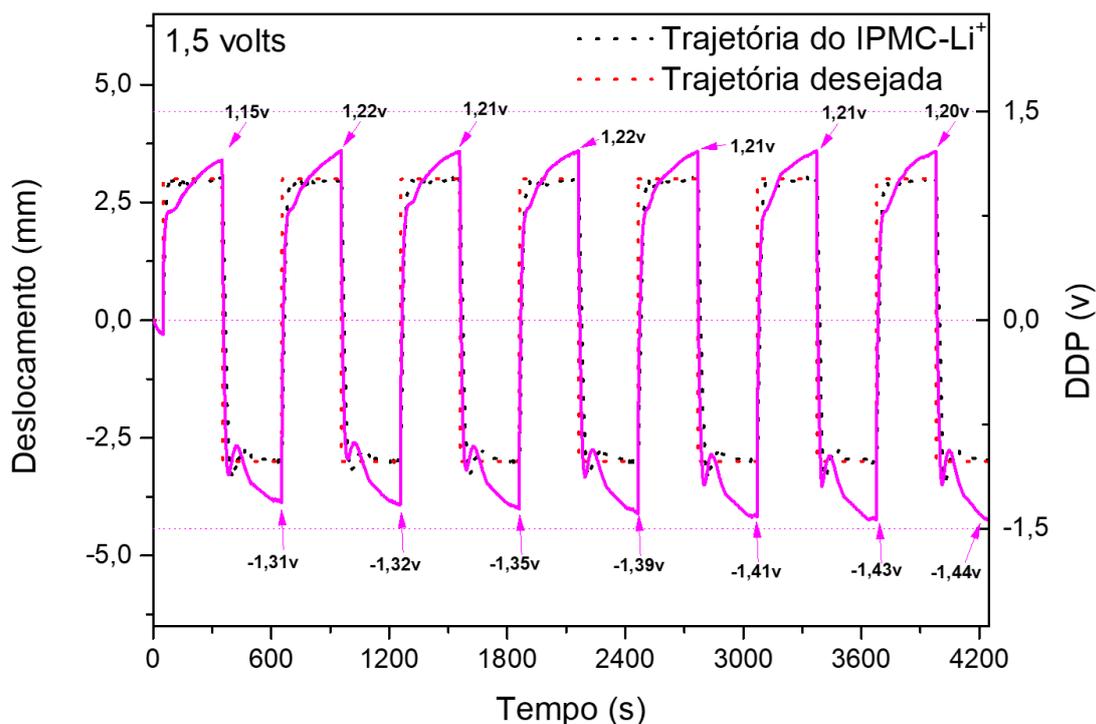


Figura 4.69 - Picos de DDP na resposta do atuador IPMC-Li com DDP = 1,5 volts

Conforme apresentado na Figura 4.69 com os picos de DDP, fazem com que o fenômeno de eletrólise começasse a aparecer. Conforme a literatura, em tensões acima de 1,23 volts ocorre uma alta taxa de perda de água por meio da evaporação, causando uma redução na mobilidade dos cátions metálicos e danos ao eletrodo metálico [186]. Essa evidência é corroborada com os valores dos picos de DDP, todos acima do valor de 1,23 volts. Essa evidência indica que por conta da perda de água no IPMC, com o tempo, essa DDP aumentaria paulatinamente até saturar o DAQ.

As variações de tensões máximas positivas relacionadas aos pontos avaliados de trajetória são de 1,22 volts no segundo ciclo (subida) para 1,20 volts no sétimo ciclo (subida), apresentando um pequeno aumento na DDP positiva para manter a trajetória desejada do IPMC ao longo do tempo. Já para as tensões máximas negativas foram de -1,31 volts no segundo ciclo (esquerda) para -1,44 volts para o sétimo ciclo (esquerda) apresentando um aumento de aproximadamente 10,0% na DDP necessária para manter a trajetória.

Por fim, na Figura 4.7070 é apresentando o ensaio realizado com DDP de -2 e +2 volts com os mesmos parâmetros anteriormente avaliados.

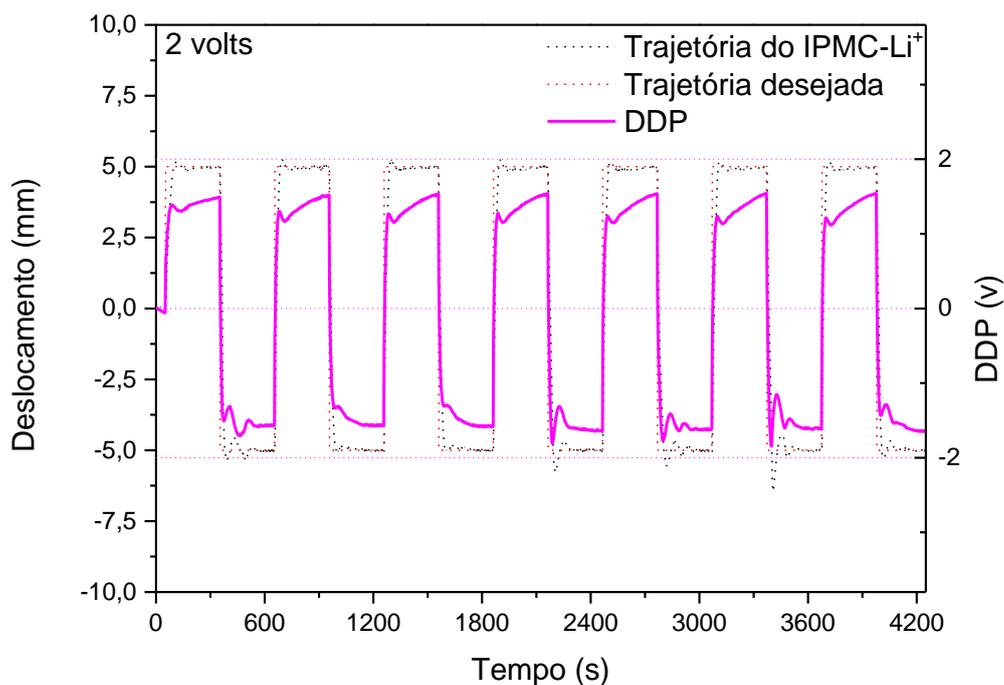


Figura 4.70 - Resposta do atuador IPMC-Li na DDP = 2 volts

Os resultados ilustrados no gráfico da Figura 4.70, apresentam uma boa performance do controlador frente às mudanças de trajetória do IPMC durante o ensaio. As variações de DDP's máximas aparentemente não são expressivas.

No segundo ciclo (direita) a DDP máxima utilizada pelo controlador para manter a trajetória desejada foi de 1,56 volts em comparação com o sétimo ciclo (direita) que foi de 1,54 volts, uma variação de aproximadamente 1,0%. Já para manter a trajetória da esquerda, o controlador necessitou fornecer -1,70 volts no segundo ciclo em relação à -1,65 volts no sétimo ciclo, uma variação de aproximadamente 3,0%.

Os dados resultantes desses ensaios apresentam uma boa performance do controlador frente a aplicações de diferentes DDP's em UR de 90%. Tabela 4.16 - Dados do comportamento dos picos da DDP para manter a trajetória desejada. abaixo, apresenta os valores de variações dos picos de DDP's necessárias para o controlador manter a trajetória do IPMC-Li em todo tempo dos ensaios.

Tabela 4.16 - Dados do comportamento dos picos da DDP para manter a trajetória desejada.

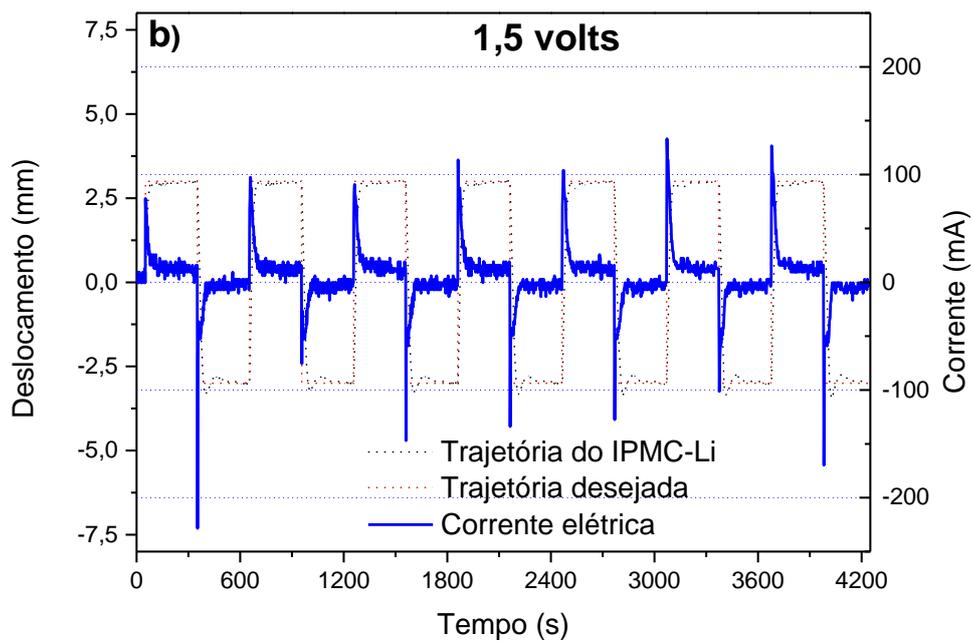
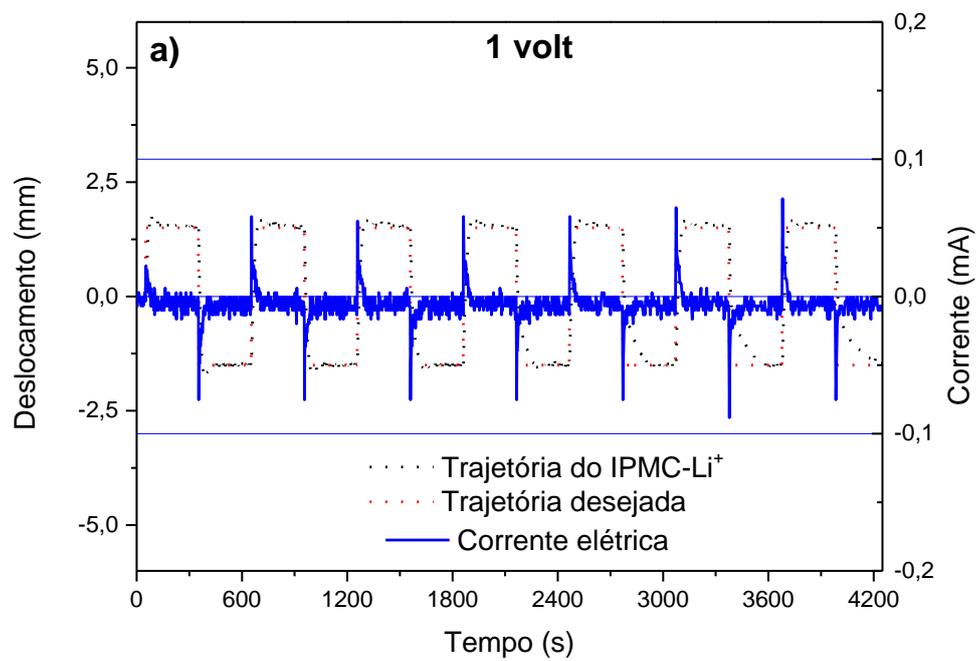
Contra-íon	DDP (v)	DDP-2 (v)	DDP-7 (v)	Variação (%)
	+1	0,15	0,09	40,0
	-1	-0,99	-1,00	1,0
IPMC-Li	+1,5	1,22	1,20	9,0
	-1,5	-1,31	-1,44	7,0
	+2	1,56	1,54	6,0
	-2	-1,70	-1,65	1,0

DDP-2 = diferença de potencial 2º ciclo; DDP-7 = diferença de potencial 7º ciclo.

Observando a Tabela 4.16 é possível avaliar a variação dos picos da DDP mais significativa como sendo a de +1 volt. Porém, mesmo havendo a maior variação entre as DDP's iniciais e finais não houve em momento alguma saturação da DDP. Já em -1 volt, houve saturação da DDP da segunda esquerda até a sétima. As hipóteses eletromecânicas e eletroquímicas para explicar isso já foram mencionadas anteriormente. Portanto, no geral, o controlador se comportou bem e foi capaz de controlar o IPMC nas diversas DDP's.

4.7.1.3 Resposta da corrente elétrica do IPMC-Li

A Figura 4.7171 abaixo, apresenta o resultado da corrente consumida durante os ensaios com DDP's de 1, 1,5 e 2 volts.



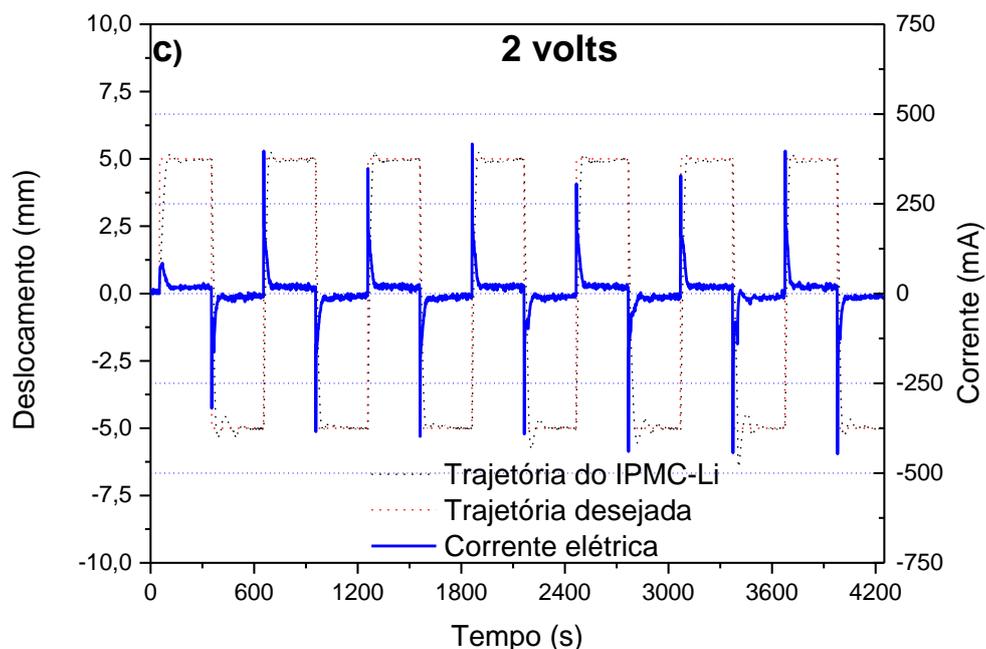


Figura 4.71 - Resposta de corrente sob a entrada de DDP = 1(a), 1,5 (b) e 2 volts (c).

A Figura 4.71 ilustra o resultado do comportamento da corrente elétrica que passa pelo atuador IPMC durante o ensaio em UR = 90% de 1, 1,5 e 2 volts. Quando a tensão é aplicada pelo sistema de controle para ajustar a trajetória, a corrente elétrica apresenta um pico e logo depois cai rapidamente até atingir o regime permanente.

Ao inverter a trajetória, e conseqüentemente a tensão, a corrente apresenta esse mesmo comportamento, porém, no sentido inverso. Esse é um comportamento análogo ao comportamento de descarga de um capacitor onde após o pico de corrente, a mesma cai exponencialmente até quase estabilizar. Este comportamento observado, é similar a um circuito RC típico, no qual, à medida que a carga no capacitor diminui, a corrente através do resistor aumenta exponencialmente.

Quando o IPMC é estimulado, os íons hidratados migram do cátodo para o ânodo em resposta a um campo elétrico gerado entre os eletrodos metálicos [187], formando uma dupla camada elétrica próxima ao eletrodo [188]. Mesmo

com a tensão mantida constante, a taxa de migração de íons diminui ao longo do tempo devido à saturação de íons nesta região, ou seja, o carregamento é seguido pela reorganização da capacitância de dupla camada. Como consequência, a corrente também diminui exponencialmente com o tempo [189]. Esse comportamento foi mais significativo na tensão de 1 volt, ilustrado na Figura 4.71.a do que nas demais tensões avaliadas.

Uma possível explicação para essa característica é que, ao ajustar a trajetória desejada utilizando a tensão máxima de 1 volt, não houve ocorrência de eletrólise. Já que a eletrólise, conforme mencionado anteriormente, ocorre após 1,23 volts. Por isso o comportamento do IPMC seguiu o modelo RC. Conforme [188], quando um condutor eletrônico eletricamente carregado (eletrodo de platina) é colocado em contato com um condutor iônico (polímero sulfonado impregnado com contra-íons solvatados com moléculas de água), ocorre a formação de uma região com espécies carregadas, com carga oposta à da superfície carregada eletricamente. Em seguida, uma segunda camada é formada próxima à primeira, a qual possui espécies com cargas iguais às da superfície eletrificada; esse par de camadas é conhecido como dupla camada elétrica [161].

Desta maneira, a distribuição de cargas dos íons diminui exponencialmente conforme aumenta a distância do eletrodo. Alguns íons podem penetrar na primeira camada e perder a camada de solvatação. Assim, é possível distinguir três regiões. O Plano Helmholtz Interno (IHP), que corresponde à primeira camada formada por moléculas de H₂O e íons não solvatados, o Plano Helmholtz Externo (OHP), que corresponde à região dos íons solvatados e, finalmente, a camada difusa [190]. A dupla camada se forma entre o IHP e o OHP.

Outra possível explicação dessa mesma natureza é que relaciona Zhu e seus colegas [191], a resposta de corrente do IPMC com as quantidades de contra-íons acumulados na interface eletrodo/ionômero. Observaram que quanto maior for a resposta da corrente maior será a carga elétrica acumulada na interface. Assim, maior migração de íons é mais difícil, provavelmente devido à razão entre estes e os canais ionoméricos.

Nas Figura 4.71 **b** e **c** o resultado foi somente um pico de corrente (para ajuste de trajetória) e depois uma quase estabilidade muito rapidamente. O que possivelmente foi mais fácil para o controlador ajustar a trajetória nessas duas DDP's em relação ao que ocorreu na DDP de 1 volt, evidenciado pela saturação da tensão durante o período do ensaio.

Na próxima seção são realizados ensaios complementares com outros contra-íons, conforme mencionado nas seções anteriores, como forma de avaliar a influência deles no sistema de controle desenvolvido.

4.7.2 Performance do sistema de controle com diferentes contra-íons

Para compreender a influência do tamanho/tipo do contra-íon na performance do controlador, realizou-se um ensaio de deslocamento cíclico de +3,0 mm e -3,0 mm utilizando máquina de estados em tensões de -1,5 a +1,5 volts para a amostra dopada com os contra-íons H^+ , Na^+ e K^+ em UR = 90%. Esse procedimento foi realizado para todos os contra-íons avaliados e a Figura 4.72 apresenta os resultados obtidos.

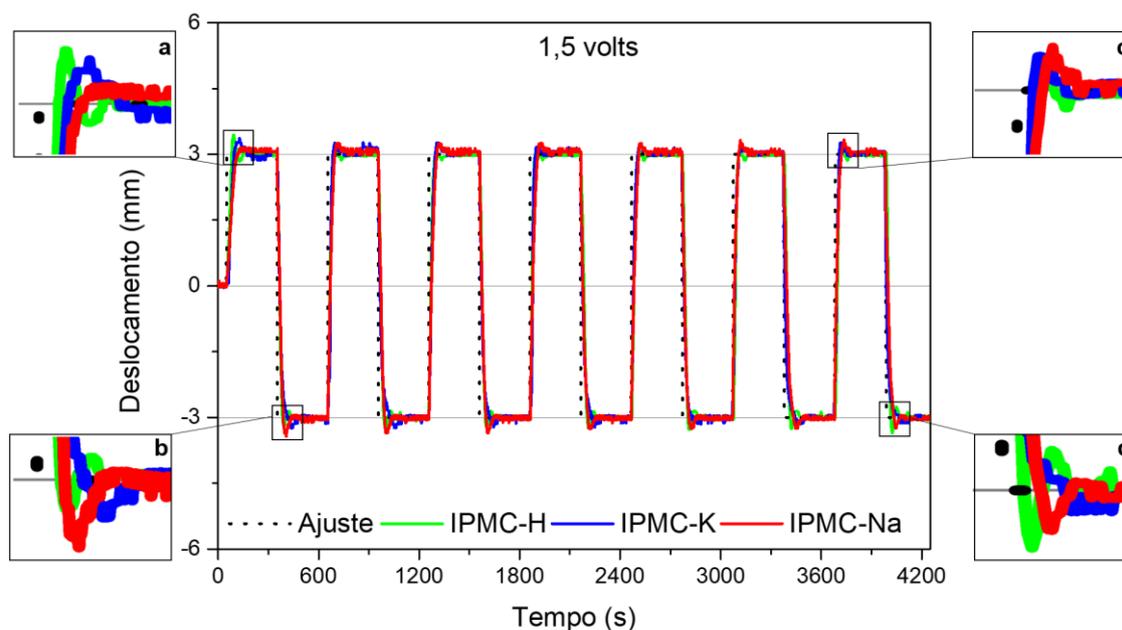


Figura 4.72 - Influência do contra-íon na performance do controlador em UR = 90%; **a)** e **c)** detalhes do primeiro e sétimo deslocamento direita; **b)** e **d)** detalhes do primeiro e sétimo deslocamento esquerda.

A Figura 4.72 ilustra os resultados do ensaio cíclico de performance. É possível observar o comportamento do atuador IPMC com difentes contra-íons submetidos ao sistema de controle. No quadrante **a**, estão contidos os primeiros picos de deslocamento. Nesse instante, o sistema de controle está ajustando a trajetória do atuador em relação a trajetória desejada. Percebe-se no primeiro ciclo (direita) de deslocamento que todos os contra-íons apresentaram *overshoot*. O mais pronunciado foi do IPMC-H, com valores próximos aos aproximadamente 15,0% do valor total de deslocamento, em tempos de 92,0 segundos com taxa de deslocamento de 0,096 mm/s. Enquanto os menos pronunciados ocorreram com o IPMC-K e IPMC-Na próximos aproximadamente 11,0% e 4,0% nos tempos de 111,0 segundos e 128,0 segundos, respectivamente.

Essa evidência, corrobora os resultados de movimentação iônica do H⁺ em matriz polimérica encontrados na literatura [192], onde o contra-íon H⁺ tem uma taxa de deslocamento muito rápida. Ao se tratar do único contra-íon que não é da família de metais alcalinos, e possuir diferente mecanismo de transporte, atribui-se essa alta resposta eletromecânica ao raio iônico (0,38 Å) que está migração através da rede ligada por hidrogênio [193].

Além disso, os demais contra-íons avaliados apresentaram menor taxa de deslocamento, 0,066 mm/s e 0,047 mm/s para o K⁺ e o Na⁺, respectivamente.

No quadrante **b** e **c** é possível observar os comportamentos dos ajustes de trajetórias durante o ensaio. Por fim, no quadrante **d**, é ilustrado o último ajuste de trajetória do atuador (sétimo ciclo). Percebe-se que o IPMC-H, em geral, foi o contra-íon que apresentou as maiores taxas de deslocamento, por mais que apresentou uma pequena queda de rendimento no quadrante **c**, no contexto geral foi o que apresentou melhor performance.

Vale ressaltar que, no geral, o sistema de controle realizou o ajuste das trajetórias para todos os contra-íons avaliados até o final do ensaio. O R² entre a trajetória desejada e a trajetória do IPMC foi de: 93,0, 92,0 e 90,0% para os contra-íons H⁺, K⁺ e Na⁺, respectivamente, provando que o sistema de controle realmente teve boa performance.

4.7.2.1 Resposta elétrica do atuador com diferentes contra-íons

Ao analisar a performance dos demais contra-íons no controlador desenvolvido, uma análise elétrica individual que pode ser feita. Essa análise compara a quantidade de DDP aplicada para cada contra-íon manter a trajetória desejada. Então, utilizou-se a DDP de -1,5 a +1,5 volts como base para avaliar esse comportamento que foi apresentado na Figura 4.72. A Figura 4.73 abaixo apresenta o resultado dos ensaios realizados em UR = 90%.

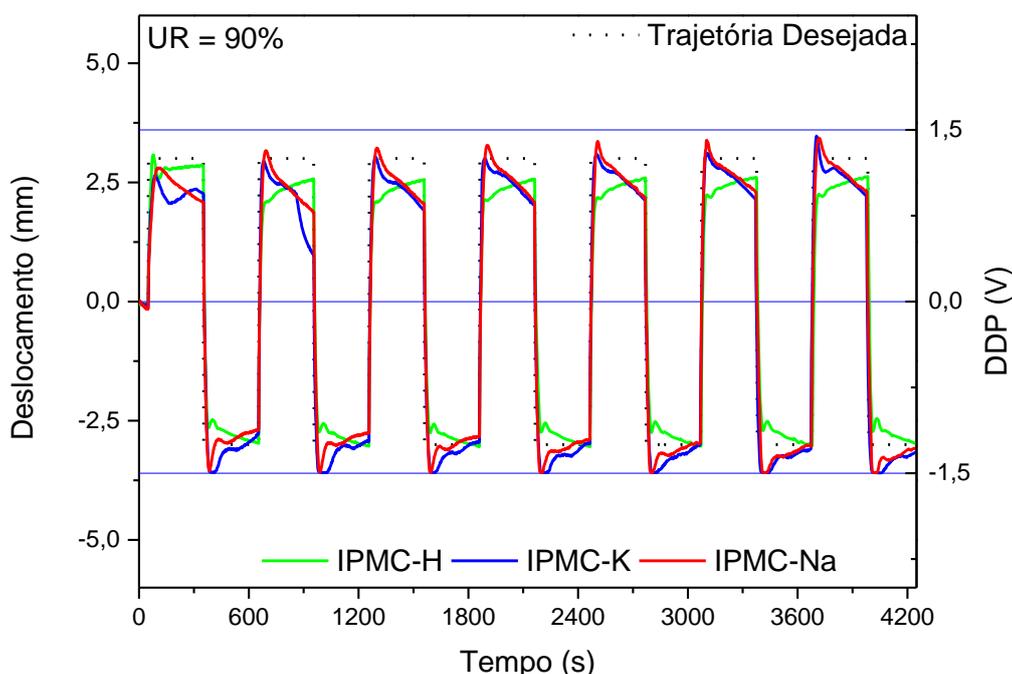


Figura 4.73 - Resposta elétrica do atuador com diferentes contra-íons em UR = 90%

Conforme os resultados apresentados na Figura 4.73, é possível observar o comportamento da DDP em resposta à mudança de trajetória do IPMC. Em nenhum dos três ensaios realizados houve saturação significativa da DDP. A amostra de IPMC-K foi a que apresentou maior tempo de saturação – tempo total em que o sistema de controle utilizou a tensão máxima do DAQ -, em contrapartida, a amostra de IPMC-H não apresentou saturação. Isso significa

que, sistema de controle forneceu menor tensão para ajustar e manter a trajetória da amostra com hidrogênio em relação às demais. Outra informação importante é que mesmo a amostra movimentando +3 mm para DDP positiva e -3 mm para DDP negativa, o sistema de controle teve que fornecer maior quantidade de energia negativa para posicionar e manter a amostra na trajetória desejada. Isso ocorreu devido a uma distribuição desigual da camada de platina nos eletrodos fazendo com que a condutividade fosse distinta e o módulo elástico fosse desigual.

Além disso, o comportamento elétrico para o IPMC-H se difere do demais. Isso significa que o IPMC-H possui um comportamento análogo aos demais contra-íons avaliados no fornecimento de DDP para manter a posição. Quando a posição de estado estacionário é alcançada, o controlador gradualmente aumenta e oscila a DDP de controle para manter a posição para tentar reduzir o erro de estado estacionário. Isso ocorre porque o atuador IPMC sucumbiu aos efeitos da relaxação reversa e requer uma tensão mais alta para manter a posição. Na próxima seção é apresentada a corrente elétrica consumida durante o ensaio, ensaio esse, já realizado para o IPMC-Li na seção anterior.

4.7.2.2 Resposta da corrente elétrica consumida pelo atuador com diferentes contra-íons

Outro fator importante a ser analisado é a corrente consumida pelo IPMC ao passo que o sistema de controle ajustou a trajetória desejada. Essa análise é importante pois como o IPMC possui um comportamento similar ao de um capacitor, uma forma, é analisar esse comportamento. Assim, quando o IPMC é acionado, os íons hidratados migram do cátodo para o ânodo em resposta a um campo elétrico gerado entre os eletrodos de metal [194], [195], formando uma camada dupla perto dos eletrodos [36], [54].

A Figura 4.74 apresenta a corrente elétrica consumida durante o ensaio cíclico de performance, ilustrado na Figura 4.65, o mesmo seguiu em DDP de -1,5 a +1,5 volts em UR = 90%.

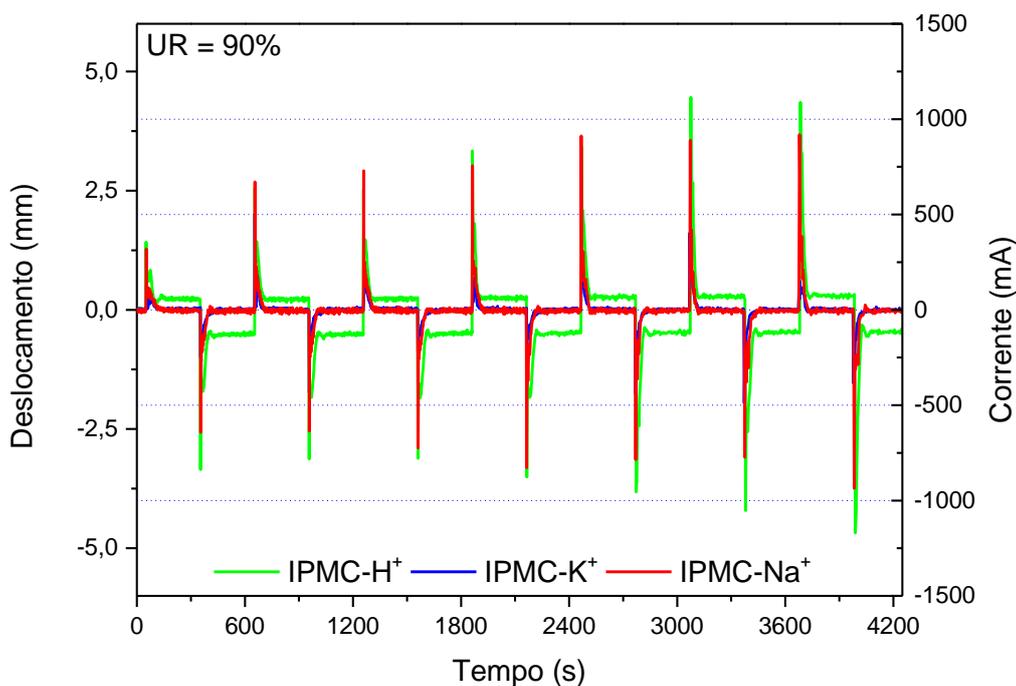


Figura 4.74 - Corrente elétrica consumida com diferentes contra-íons.

Ao analisar a Figura 4.74 é possível identificar uma característica distinta do IPMC-H. A corrente consumida dele é muito mais acentuada que a dos demais contra-íons avaliados. Além dos picos mais significativos, o mesmo apresenta uma característica diferenciada no perfil da corrente ao ser estimulado nos primeiros pós picos das correntes positivas e nos demais pós picos das correntes negativas (grifos circulares) detalhados na Figura 4.75 abaixo:

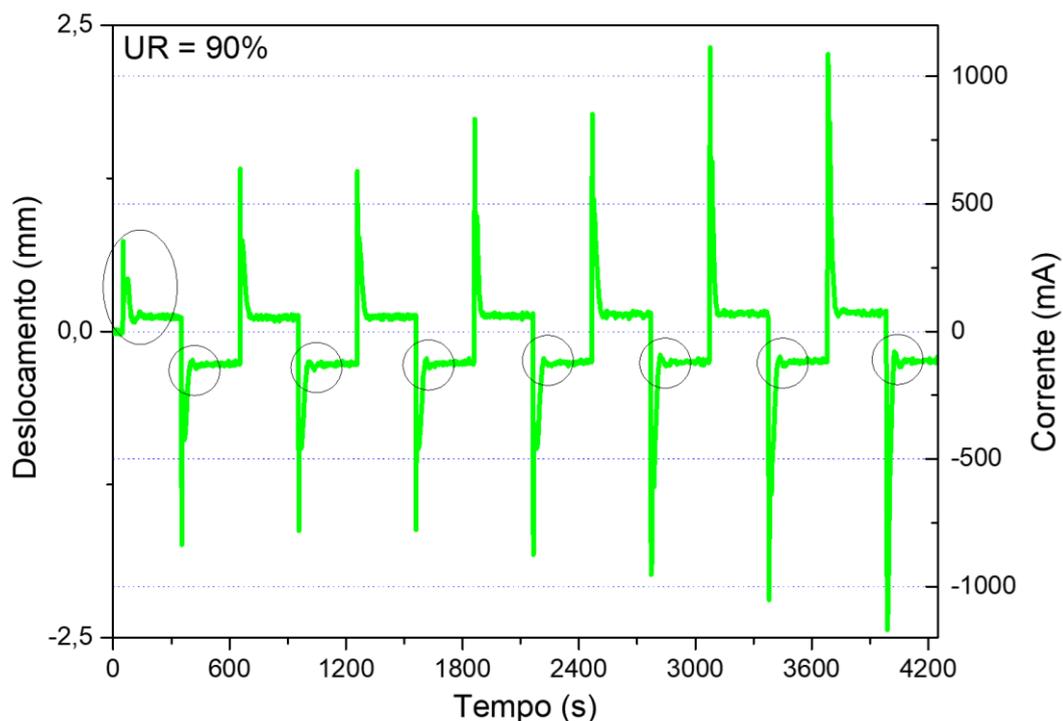


Figura 4.75 - Picos e pós picos da corrente consumida pelo IPMC-H (no detalhe da Figura 4.74)

Esse comportamento peculiar do próton H^+ foi estudando anteriormente pelo nosso grupo em um outro trabalho e apresentou esse mesmo comportamento da corrente. Vale lembrar que no estudo anterior, a avaliação foi referente a influência do contra-íon e da UR no comportamento eletromecânico do atuador IPMC [52].

É importante destacar que, segundo Gierke et al. [196], os mecanismos de transporte iônico no Nafion® podem ser descritos pelas leis de difusão aquosa. O modelo de Gierke também inclui efeitos de polaridade, constante dielétrica e orientações espaciais não homogêneas. Sabe-se que, quando uma DDP acima de 1,23 volts é aplicada, pode ocorrer eletrólise da água, especialmente em um meio de pH baixo [197], [198], portanto, essa resposta atípica da corrente pode ser associada ao processo de eletrólise [199]. A eletrólise da água é um fenômeno físico caracterizado pela decomposição da água em produtos gasosos: hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2).

As moléculas de H_2 são formadas no cátodo e as moléculas de O_2 no ânodo. Este processo causa a secagem intensiva do IPMC e resulta em um consumo de corrente maior do que o necessário para a atuação do mesmo [200].

Além do mais, ao avaliar os dados da tensão minuciosamente, é possível identificar que os picos de tensão (vide Figura 4.76) que ultrapassam a tensão de 1,23 volts são os picos que apresentam um segundo pico menor visível no gráfico de corrente (vide Figura 4.75) portanto, esse indício prova que esse comportamento distinto do H^+ pode ser decorrente da eletrólise.

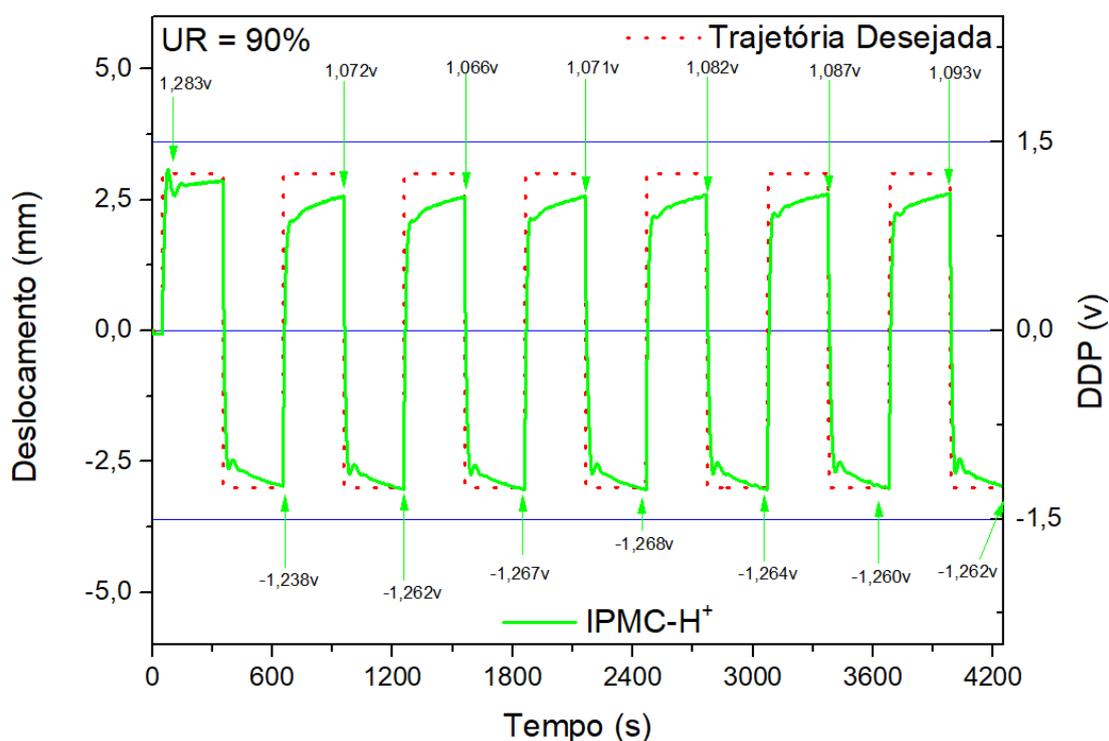


Figura 4.76 - Picos de tensão IPMC-H para análise de eletrólise.

Para o contra-íon Na^+ , a corrente consumida é inferior (Figura 4.77) se comparado ao H^+ e não apresenta, visualmente, o fenômeno de eletrólise, conforme observado no ensaio com o H^+ . Resultados que refletem o comportamento elétrico desigual dos eletrodos do IPMC e consequentemente desigualdade no módulo elástico do material, confirmado no ensaio de quatro pontas da seção 4.4.1.

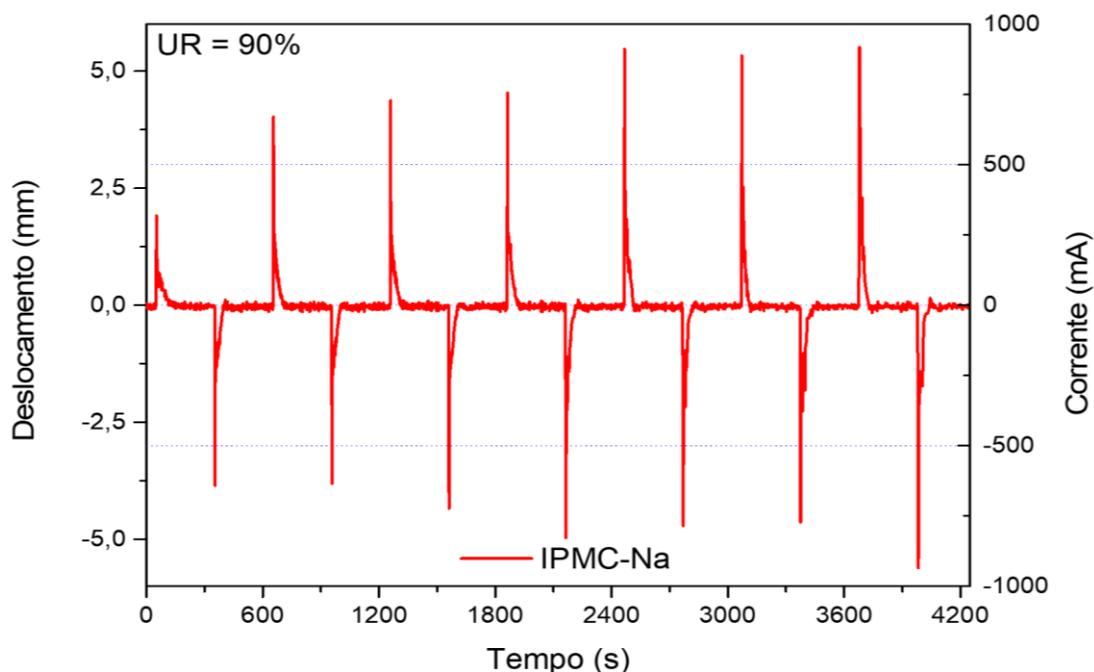


Figura 4.77 - Picos da corrente consumida pelo IPMC-Na (no detalhe da Figura 4.67)

As curvas de de corrente ilustradas não apresentaram qualquer indício de eletrólise visual, isto é, não há, nenhuma distorção significativa nas curvas de corrente que dê indícios de presença de eletrólise. Porém, se avaliarmos detalhadamente os picos de tensão (vide Figura 4.78) ocorridos durante o ensaio com o contra-íon Na^+ , é possível observar que exceto o primeiro pico de tensão, todos os demais foram superiores a 1,23 volts, significando que houve eletrólise, no entanto, não é possível identificar mudança de comportamento da curva de tensão nem de corrente para explicar esse fenômeno.

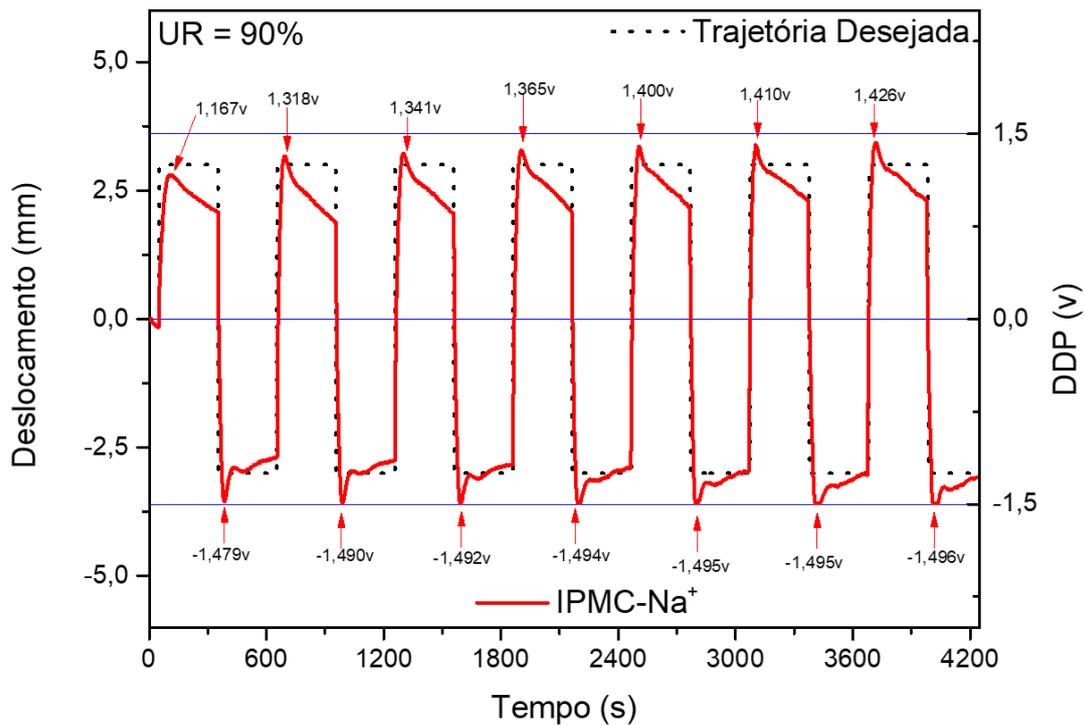


Figura 4.78 - Picos de tensões do IPMC-Na no ensaio de performance.

E por fim no comportamento do K⁺, houve um baixo consumo de corrente para manter o IPMC na trajetória desejada e não foi observado, visualmente, o mesmo fenômeno de eletrólise observado no H⁺, conforme ilustrado na Figura 4.786.

A Figura 4.799, é ilustrado o resultado detalhado dos picos e da corrente consumida do contra-íon K⁺.

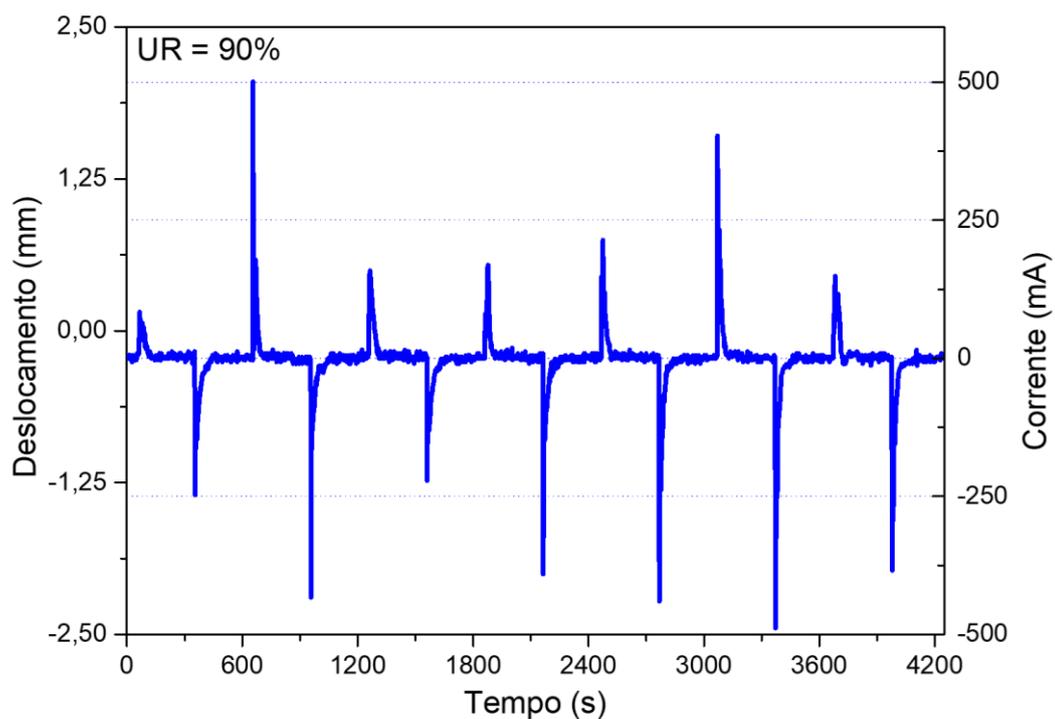


Figura 4.79 - Picos da corrente consumida pelo IPMC-K.

Os resultados ilustrados nas curvas de corrente refletem o comportamento do deslocamento do IPMC, que mesmo o sistema de controle mantendo a posição do IPMC na trajetória desejada, o fenômeno da eletrólise ocorreu em todo o ensaio, exceto no primeiro pico de tensão (1,097 volts), conforme ilustrado na Figura 4.80.

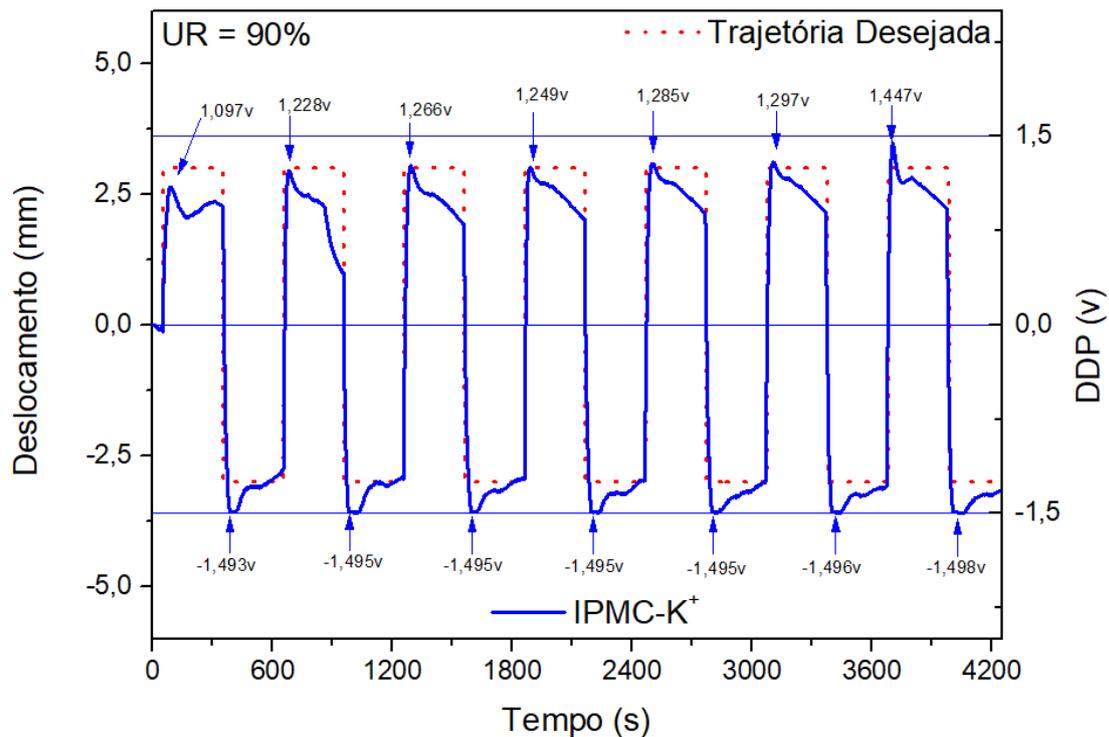


Figura 4.80 - Picos de tensão IPMC-K para análise de eletrólise.

Por fim, é possível concluir que a presença de eletrólise ocorreu nos três contra-íons avaliados, em dois deles, (Na^+ e K^+) não foi possível identificar, visualmente, o fenômeno ocorrendo.

Para o ensaio realizado com o H^+ , observa-se o fenômeno da eletrólise nas curvas de corrente e/ou tensão. Isso se deve ao fato de o hidrogênio possuir uma difusão em meio aquoso diferenciada, ao conforme já mencionado, “salta” através da rede aglomerados no interior do polímero. Além do mais, sabe-se que em meios de baixo pH a ocorrência de eletrólise é facilitada.

E finalmente, o fenômeno de relaxação reversa fica muito evidente no ensaio realizado com H^+ , é possível identificar o fenômeno somente observando as curvas de DDP. Já nos demais contra-íons, esse fenômeno não foi observado, por mais que a literatura relate que a relaxação reversa é um fenômeno intrínseco desses compósitos dopados com contra-íons metais alcalinos em ambientes com alta teor de umidade [201], [202], nos ensaios aqui realizados, o mesmo não foi observado. Na próxima seção é realizado ensaio de performance

sob diferentes UR, com finalidade de avaliar a influência desta no comportamento do IPMC.

4.7.2.3 Influência da UR na performance do atuador IPMC

Outro fator determinante para o bom funcionamento do atuador IPMC é avaliar a influência da UR no seu deslocamento, conforme discutido anteriormente, enfatizando a importância de a matriz polimérica estar hidratada para poder haver uma boa difusão iônica e conseqüentemente um bom desempenho eletromecânico. Esse ensaio, tem por objetivo avaliar a influência da UR na performance do atuador variando os contra-íons. Para isso, utilizou-se três contra-íons, H^+ , K^+ e Na^+ - já que para o Li^+ foi detalhado anteriormente - em uma DDP, nesse caso, de -1,5 a +1,5 volts em 60 e 30% de UR, já que em 90% foi avaliado anteriormente.

Portanto, a Figura 4.81 abaixo ilustra os resultados obtidos após a realização dos ensaios.

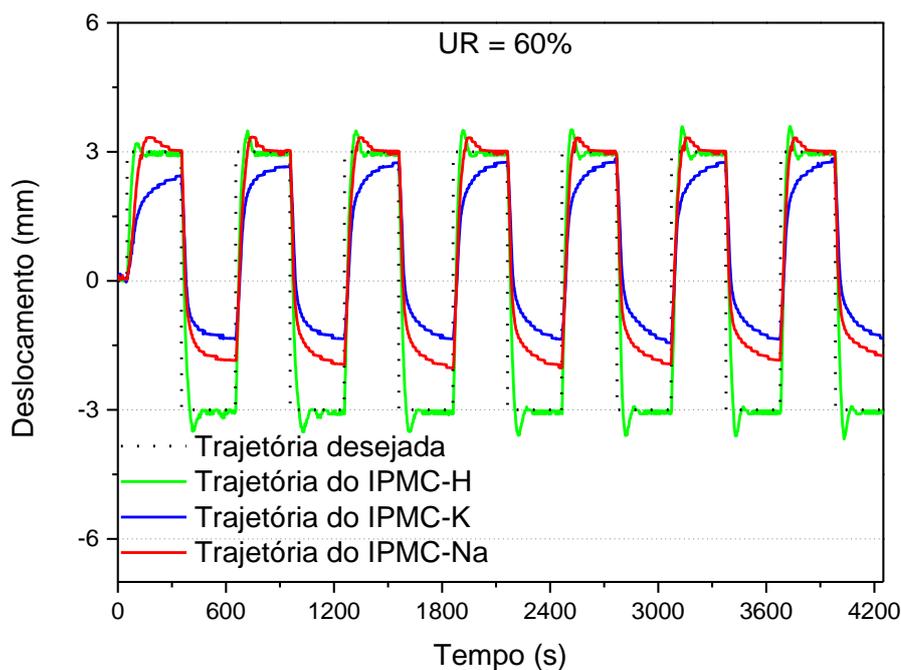


Figura 4.81 - Comportamento dos diferentes contra-íons na performance do sistema de controle em UR = 60%.

Analisando a Figura 4.811, percebe-se o comportamento do atuador no ensaio cíclico de performance. De imediato, identifica-se a estável trajetória do IPMC-H, respondendo muito bem ao ajuste imposto pelo sistema de controle com um pequeno *overshoot* de aproximadamente 6,0%. Nesse ensaio, mesmo com UR inferior ao ensaio anterior, o IPMC-H conseguiu um bom resultado de performance.

Entretanto, ao analisar o resultado do IPMC-Na, em relação ao ensaio em UR = 90%, o mesmo, apresentou uma perda nítida de desempenho. Este, foi mais influenciado pela redução da UR do que o H⁺. Isso pode estar associado ao tamanho do cátion, que possui um raio maior e conseqüentemente pode ter apresentado maior dificuldade para se mover através dos canais ionoméricos, além do mecanismo de difusão ser distinto. Para o deslocamento da direita (DDP positiva) o atuador chegou até a trajetória ajustada, porém, para o deslocamento esquerdo (DDP negativa) não apresentou o mesmo desempenho. Esse comportamento, pode estar associado às características elétricas dos eletrodos e diferença de módulo.

Nesse sentido, o IPMC-K também apresentou grandes dificuldades de movimentação com a redução da UR em relação a todos os contra-íons avaliados. Isso também pode ter relação direta com o tamanho do raio iônico, já que o K⁺ é o maior entre eles.

A Figura 4.82 apresenta o comportamento da DDP no ensaio cíclico de desempenho dos contra-íons H⁺, Na⁺ e K⁺. Essa análise é importante para avaliarmos fenômenos como a ocorrência ou não de relaxação reversa durante o ensaio.

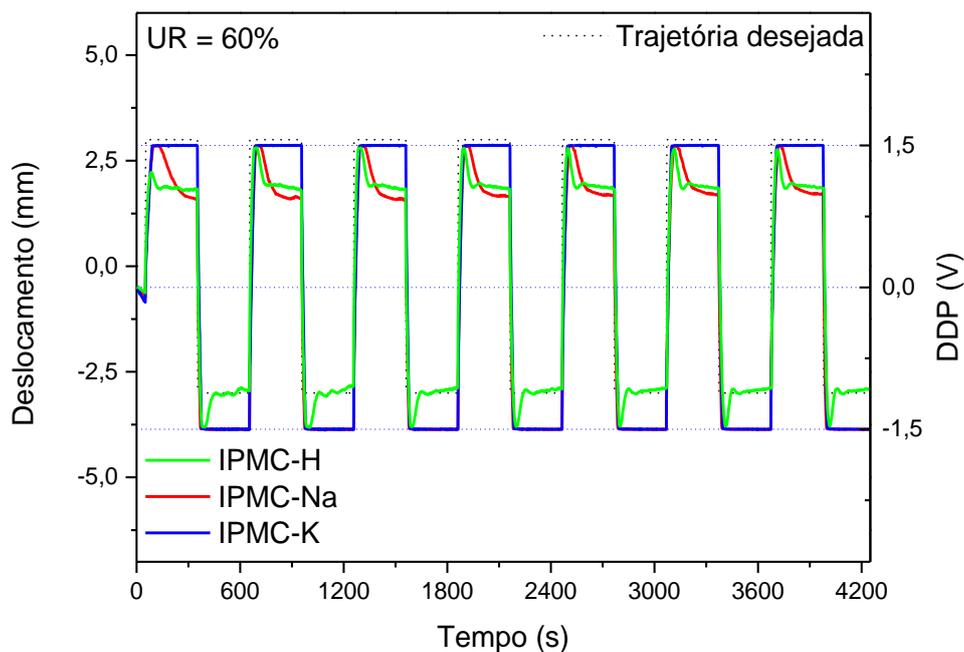


Figura 4.82 - Resposta da DDP no ensaio de performance apresentado na Figura 4.81

Ao avaliar o comportamento da DDP, podemos claramente perceber que não houve saturação elétrica no ensaio do contra-íon IPMC-H. Somente no momento de ajuste de trajetória, alcança a tensão máxima, contudo, por alguns poucos segundos e já estabiliza a tensão até o final de cada ciclo do ensaio. Não é observado o fenômeno de relaxação reversa desse contra-íon, e essa conclusão é evidenciada pelo decréscimo de tensão após atingir o ajuste da trajetória do atuador. Além disso, é possível avaliar se houve ou não perda de desempenho do início para o final do ensaio.

Contrariando o ensaio de $UR = 90\%$ que apresentou relaxação, evidenciada pela DDP continuar aumentando gradativamente para manter a trajetória estável. Nesse ensaio, não foi identificado esse comportamento. Isso significa que, há uma relação direta entre a relaxação reversa e altas UR's. Conforme o estudo de Zhu [203] e seus colegas apontaram que o grau de hidratação possui um papel central no fenômeno da relaxação reversa, onde a remoção de uma fração da água no ionômero pode ser usada para reduzir significativamente esse fenômeno.

Para o ensaio com o contra-íon Na^+ , houve saturação total da DDP negativa durante todo o ensaio. Isso significa que não houve DDP suficiente para manter a trajetória ajustada, ou, os íons não tiveram mobilidade suficiente para difundir através dos canais ionoméricos e provocar uma diferença de pressão interna suficiente para proporcionar a deformação suficiente do atuador. Essas, são as duas conclusões possíveis analisando o comportamento da DDP. Já na DDP positiva houve poucos segundos de saturação, para manter a trajetória e logo depois houve um decréscimo esperado, já que o atuador atingiu a trajetória desejada mais facilmente e assim, bastava ao sistema de controle mantê-la estável. Esse comportamento se propagou até o final do ensaio, além do mais, não foi observado a ocorrência do fenômeno de relaxação reversa.

No ensaio do K^+ , houve uma saturação da DDP em todos os momentos do ensaio, e mesmo assim, não foi possível ajustar a trajetória. Com isso, pode-se concluir que, o tamanho do contra-íon foi principal responsável pela menor movimentação do IPMC.

A Figura 4.83 abaixo, ilustra o comportamento da corrente elétrica consumida pelo atuador durante o ensaio cíclico de performance.

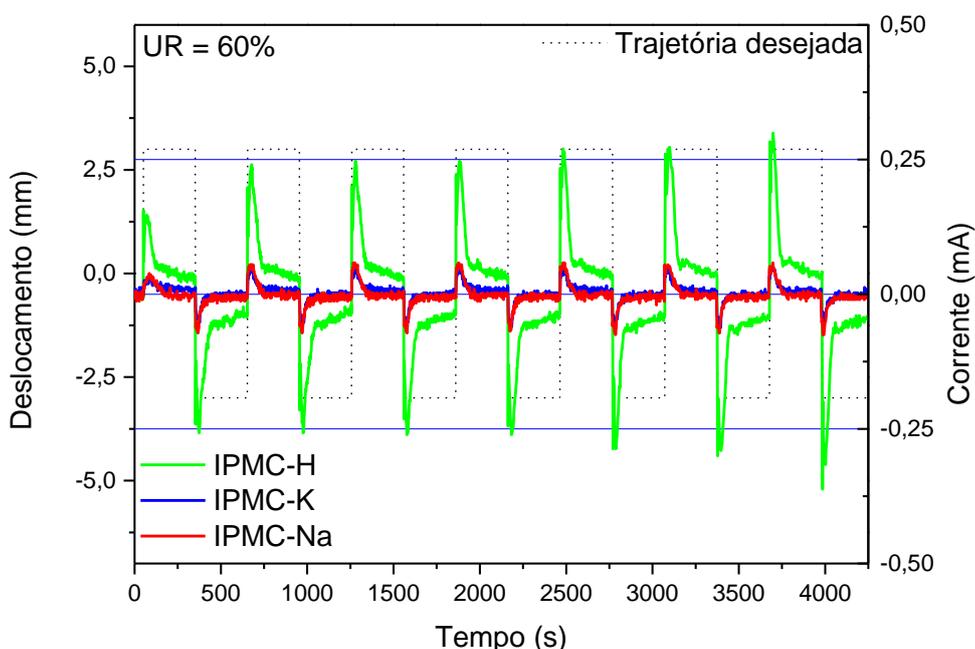


Figura 4.83 - Resposta da corrente consumida pelo atuador no ensaio de performance, ilustrado na Figura 4.81

Nesse ensaio, observando a curva do IPMC-H, fica claro que, para realizar o movimento, além de manter na posição desejada há um consumo de corrente superior aos demais contra-íons. Além disso, observa-se logo depois do pico de corrente (próximo de 250 mA) há uma queda acentuada na ordem de 10x (aproximadamente 25 mA), e logo depois outro pequeno pico (aproximadamente 50 mA). Esse comportamento é característico de amostras de IPMC dopadas com H^+ ; conforme já discutido anteriormente, essa resposta atípica da corrente que pode ser associada ao processo de eletrólise.

Já a corrente consumida pelo Na^+ e K^+ foram similares, para as DDP's positivas, a corrente consumida do K^+ foi maior, em contrapartida, para as DDP's negativas, a corrente consumida do Na^+ foi maior. Isso pode estar relacionado à um "favorecimento mecânico" derivado do processo de deposição da camada de platina desproporcional dos eletrodos, corroborado pela curva de DDP apresentado na Figura 4.82, onde houve pequena saturação de tensão positiva (movimento direita) em detrimento de grande saturação de tensão negativa (movimento esquerda). Por fim, baixos consumos de corrente foram observados nos contra-íons Na e K^+ em relação ao H^+ .

A Figura 4.84 abaixo, mostra o controle de trajetória da amostra de IPMC com os contra-íons H^+ , Na^+ e K^+ para UR = 30%. A DDP utilizada nesse ensaio foi de -1,5 e +1,5 volts com objetivo de comparação com as demais UR já avaliadas.

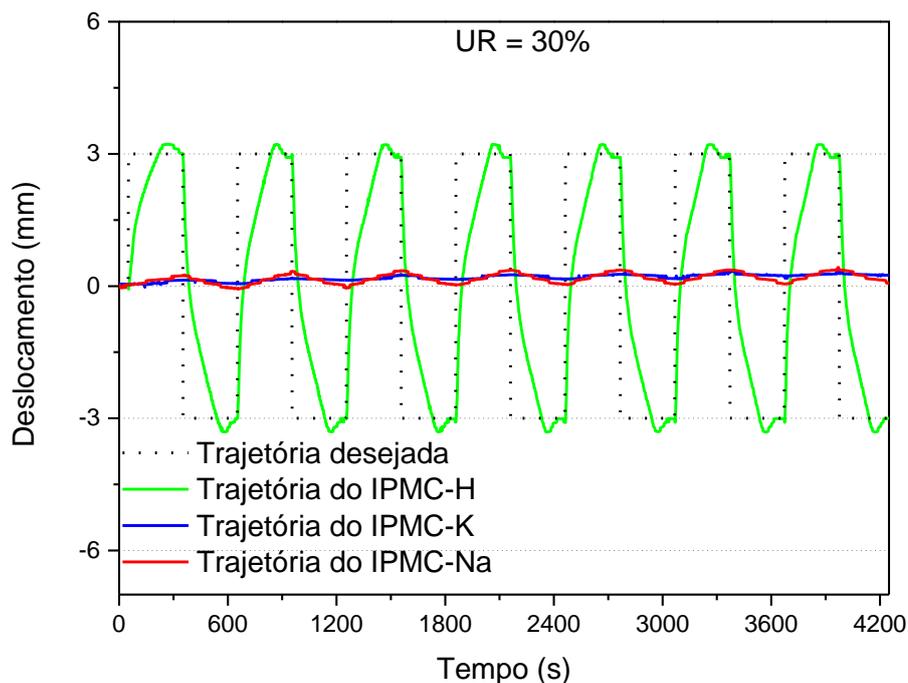


Figura 4.84 - Comportamento dos diferentes contra-íons na performance do sistema de controle em UR = 30%.

Nesse ensaio de deslocamento é possível observar uma redução brusca na movimentação do atuador. O IPMC-H ainda apresentou uma movimentação significativa conseguindo atingir a trajetória ajustada mesmo apresentando uma taxa de deslocamento muito inferior às demais UR de 90 e 60% apresentadas anteriormente.

Esse comportamento ilustra o quão dependente de UR são os IPMC's. Além disso, apresenta diferentes comportamentos do H^+ para com o do Na^+ e do K^+ . Nesse ensaio fica evidente que o H^+ não é tão dependente assim da UR, ou seja, o contra-íon consegue ainda se mover mesmo em baixas UR's. Vale ressaltar que o H^+ não pertence à família dos metais alcalinos e sua forma de difusão em meio aquoso é diferente dos demais contra-íons avaliados.

Ao avaliar a resposta do K^+ e Na^+ se observa uma clara dificuldade de movimentação, apresentando deslocamento próximos aos 0,25 mm além de taxas de deslocamento baixíssimas em relação ao H^+ . Esse resultado reflete a dificuldade de o contra-íon atravessar a membrana polimérica pelos canais que,

nessa UR, estão com diâmetros diminuídos e com baixa quantidade de água no seu interior, reduzindo a mobilidade iônica. A Figura 4.85 abaixo, ilustra a resposta da DDP no ensaio de controle da trajetória.

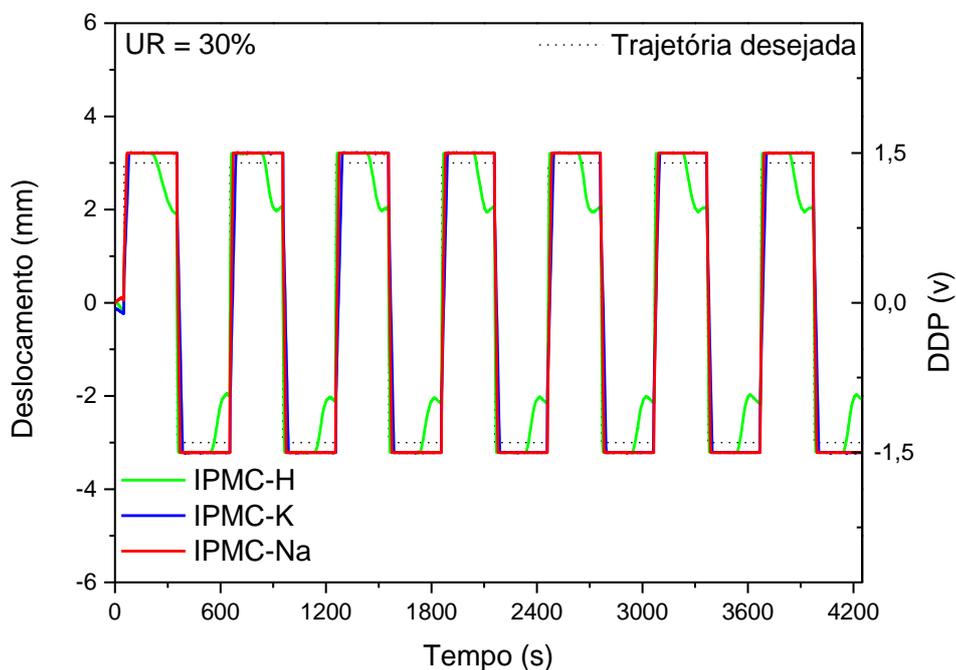
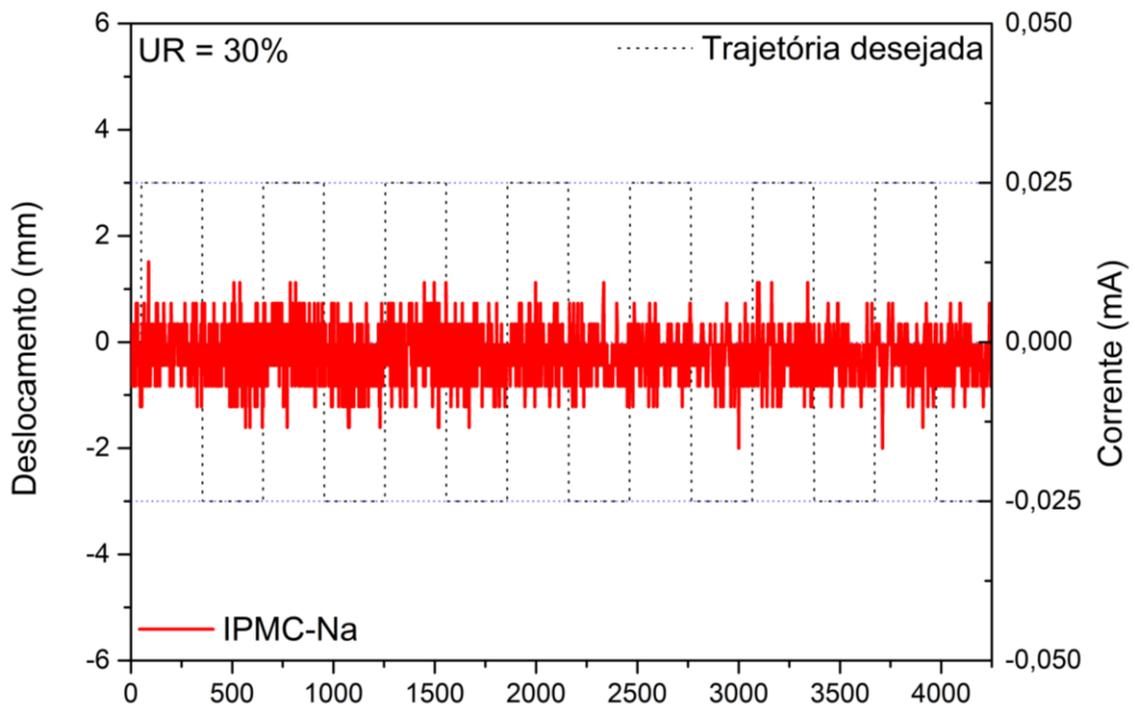
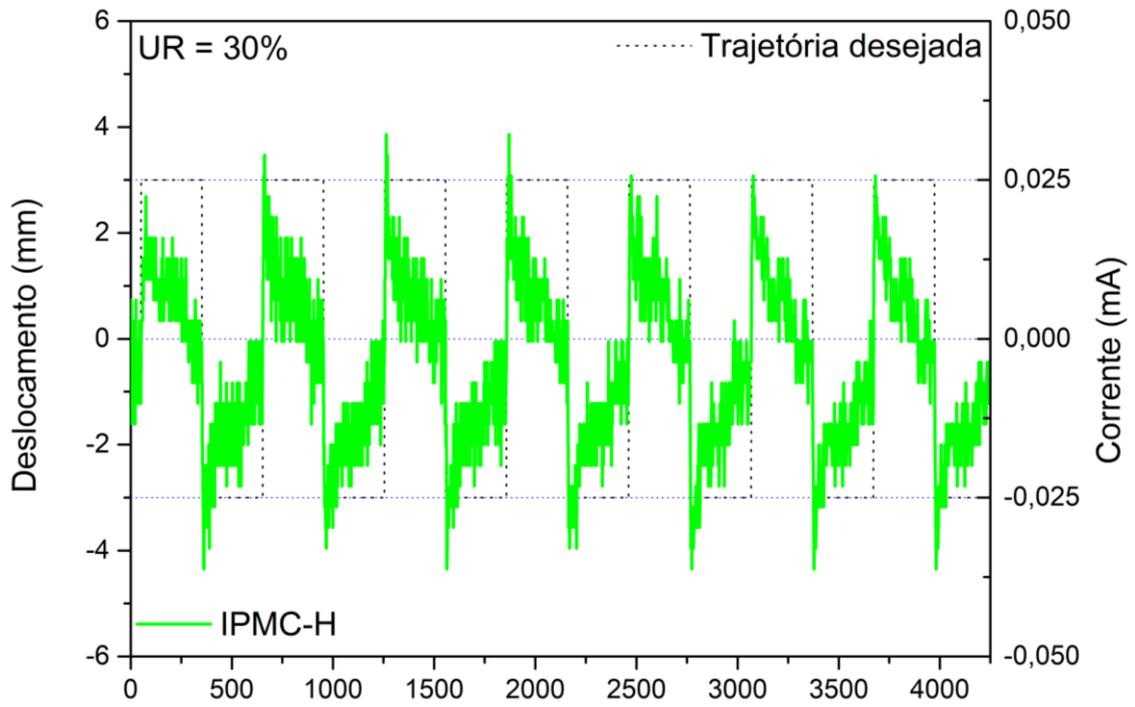


Figura 4.85 - Resposta da DDP no ensaio de performance

O gráfico acima ilustra a resposta da DDP durante o ensaio cíclico de performance. Fica nítido que houve saturação de tensão para todos os contra-íons em todos os momentos do ensaio, exceto quando o H^+ atinge a trajetória desejada e então a tensão decresce paulatinamente até estabilizar. Com esse resultado duas conclusões são plausíveis, **i)** se não houvesse limite de tensão em -1,5 e +1,5 volts no DAQ, uma maior DDP seria fornecida pelo sistema de controle e com isso, haveria uma maior movimentação do dispositivo. Nesse cenário, isso não foi permitido para não haver avarias nos eletrodos da amostra e assim comprometer as demais análises; **ii)** aumentando a UR haveria um menor tempo de saturação proveniente da maior movimentação do IPMC, evidência essa, que já foi corroborada nas discussões anteriores.

Por fim, na Figura 4.86 abaixo, é ilustrado a corrente elétrica consumida durante o ensaio de controle de trajetória do IPMC.



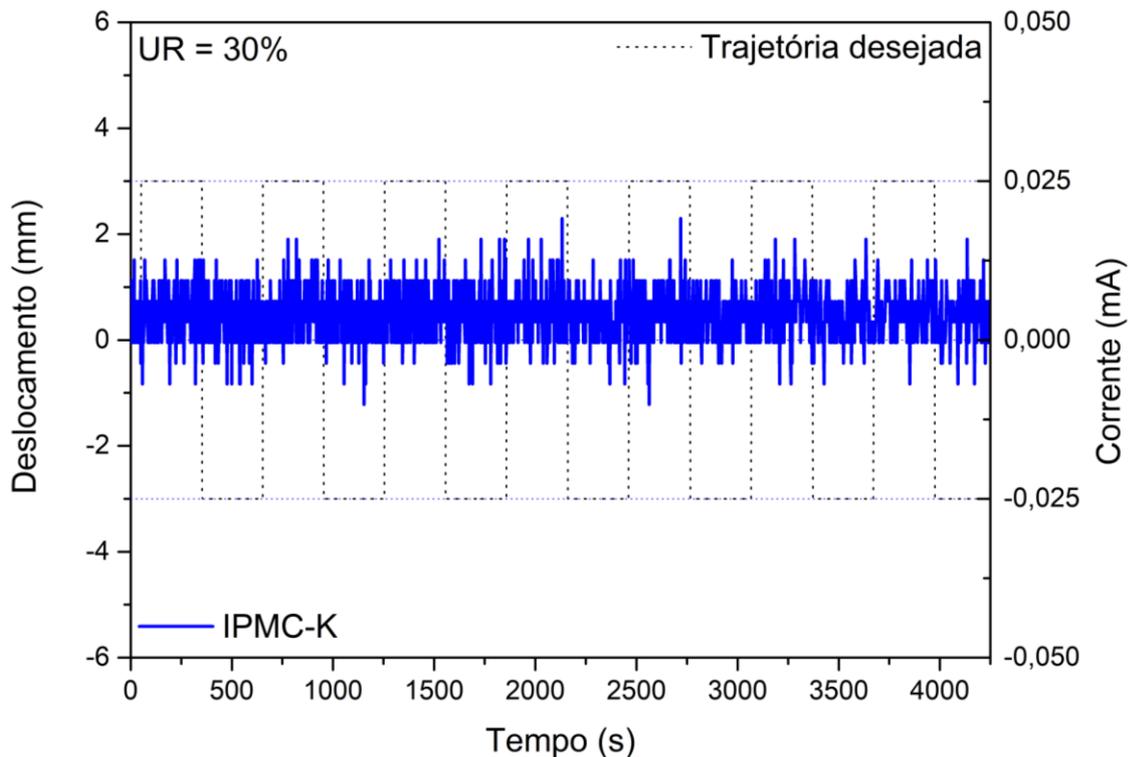


Figura 4.86 - Resposta da corrente elétrica consumida durante o ensaio de performance.

Nesse gráfico da Figura 4.86 é possível identificar um maior consumo de corrente elétrica pelo IPMC- H^+ , esse resultado da corrente é relacionado ao movimento do IPMC [52], sendo assim, o contra-íon que proporcionou maior deslocamento é o que consumiu maior corrente elétrica. Outra avaliação possível de se fazer com relação aos picos de corrente, para o H^+ foi na média de 30 mA, enquanto os demais contra-íons foi de aproximadamente 10 mA.

Assim, após a realização desses ensaios ficou evidente que o sistema de controle desenvolvido foi capaz de controlar o IPMC com os mais diversos contra-íons em ambiente com UR alta. Em UR intermediária, de 60%, o sistema de controle conseguiu manter na trajetória desejada do atuador dopado com H^+ , porém, do Na^+ e K^+ os resultados de controle foram apenas satisfatórios. Em baixa UR, 30%, o sistema de controle não conseguiu ajustar e manter os IPMCs dopados com Na^+ e K^+ e, portanto, teve desempenho ruim.

Ao final, é possível fazer uma avaliação complementar da carga acumulada pelo atuador IPMC, integrando a corrente elétrica de cada contra-íon

em função da UR. Esses dados foram obtidos durante os ensaios de performance dos contra-íons e refletem o consumo da corrente elétrica necessário para fazer com que o atuador atingisse a posição ajustada e a mantivesse estável no tempo total do ensaio. Os resultados estão exibidos no gráfico da Figura 4.87.

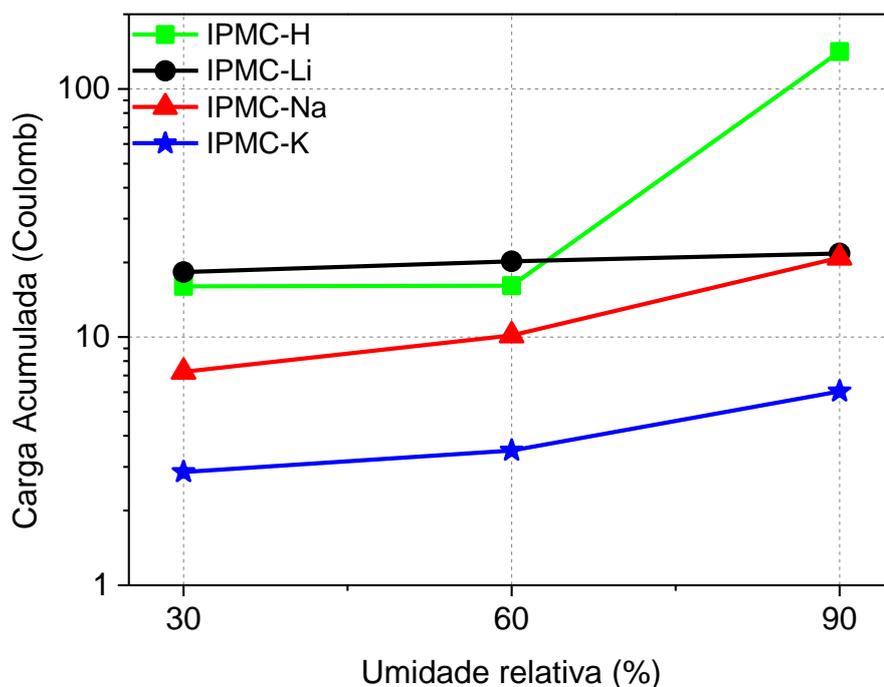


Figura 4.87 – Corrente elétrica consumida em função da UR para vários contra-íons

Em geral, a carga consumida aumenta com o nível de hidratação da amostra. Além disso, pode-se observar que a carga elétrica consumida é fortemente influenciada pelo contra-íon utilizado. Para cátions de metais alcalinos, em UR's iguais ou menores a 60%, a queda do consumo é proporcional ao aumento do raio iônico, o que não se reflete para UR=90% para o caso do Li^+ e do Na^+ , onde apresentam praticamente a mesma carga, esses dados são corroborados pelo gráfico de Bode no ensaio de espectroscopia de impedância discutidos na seção 3.4.3.2. Isso pode estar associado à uma redução em sua camada de solvatação. Por outro lado, o IPMC-H apresentou um consumo de carga muito expressivo (quase 7x maior em relação ao Li^+), com

a umidade alta; mais uma vez, como explicado anteriormente, esse fato está associado à ao fenômeno de eletrólise.

Vale lembrar que a questão de baixas UR são situações em que comprometem o mecanismo de funcionamento do atuador IPMC baseado em Nafion® e não o sistema de controle aqui desenvolvido.

Na seção abaixo, uma correlação entre o controle de trajetória e as propriedades do IPMC são discutidos como uma forma complementar de caracterizar IPMCs.

4.8 Correlação entre Controle de Trajetória e Propriedades do IPMC

Conforme mencionado na seção 3.4.4 a correlação entre a técnica de controle de trajetória do IPMC e suas propriedades é uma maneira complementar de caracterizar esses materiais.

Com base nos tempos dos ensaios de estabilidade e performance realizados, algumas correlações são facilmente deduzidas pela técnica de controle aqui desenvolvida. Assim, alguns parâmetros foram definidos de forma arbitrária para inferir qual é o contra-íon mais adequado e o ambiente mais favorável para utilização de um sistema de controle para esses dispositivos. São eles, tempo de estabilização médio ≤ 10 segundos, é considerado um tempo de estabilização **muito rápido**, entre 11 e 30 segundos é considerado **rápido**; entre 31 e 60 segundos é **lento** e; tempos de estabilização > 60 segundos é **muito lento**. Outra informação apresentada é, se o IPMC dopado com um contra-íon específico não conseguiu ajustar e muito menos estabilizar a trajetória. Tabela 4.17 - Correlação entre parâmetros de controle a contra-íon recomendado abaixo apresenta essas correlações.

Tabela 4.17 - Correlação entre parâmetros de controle a contra-íon recomendado

Aplicação	DDP (volts)	Umidade relativa (%)	Tempo de uso	Deslocamento máximo	Ajuste de trajetória	Tempo de estabilização	Contra-íon recomendado	
Estabilidade	1,6 a 3,4	90	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Muito rápido	Li ⁺ , H ⁺	
						Rápido	Li ⁺ , Na ⁺ , K ⁺	
						Lento	-	
		60	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Muito lento	-	
						Não	-	
						Muito rápido	-	
	30	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Rápido	Li ⁺ , H ⁺ , Na ⁺		
					Lento	-		
					Muito lento	-		
	Performance	1,6 a 3,4	90	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Muito lento	K ⁺
							Não	-
							Muito rápido	-
60			300s por posição	Até 5 mm	Sim	Rápido	-	
						Lento	Li ⁺	
						Muito lento	H ⁺	
30	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Muito lento	Na ⁺ , K ⁺			
				Não	-			
				Muito rápido	H ⁺			
Performance	1,6 a 3,4	90	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Rápido	Li ⁺ , H ⁺ , Na ⁺ , K ⁺	
						Lento	-	
						Muito lento	-	
		60	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Não	-	
						Muito rápido	-	
						Rápido	-	
	30	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Lento	Li ⁺ , H ⁺		
					Muito lento	Na ⁺		
					Não	K ⁺		
	Performance	1,6 a 3,4	90	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Muito lento	Li ⁺ , H ⁺
							Não	-
							Muito rápido	-
60			300s por posição	Até 5 mm	Sim	Rápido	-	
						Lento	-	
						Muito lento	Li ⁺ , H ⁺	
30	300s por posição	Até 5 mm	Sim	Muito lento	Na ⁺ , K ⁺			
				Não	-			
				Muito rápido	-			

A tabela 4.17 apresentou uma sumarização dos resultados obtidos neste trabalho no que tange o contra-íon mais adequado para ser utilizado em atuadores IPMC baseados em Nafion® em aplicação prática. As evidências colhidas nos ensaios de estabilidade e de performance subsidiaram essa indicação. Os resultados apresentados comprovam a influência da UR no desempenho do atuador o que é corroborado pela literatura [75], [114], [204], [205]; inclusive pelo próprio grupo de pesquisa anteriormente [3].

É possível perceber que para aplicações de estabilidade por um longo período, onde na prática, um atuador seria induzido a trabalhar em ambiente úmido – 90% - e em posição fixa, todos os contra-íons avaliados conseguiram realizar essa tarefa de forma **rápida** ou **muito rápida**. Isso são indicativos da alta mobilidade iônica no interior do polímero. Porém, conforme o ambiente vai secando, próximo à UR ambiente (60%) os contra-íons mais adequados foram: H^+ , Li^+ e Na^+ que estabilizaram as posições desejadas em tempos **rápidos**, sendo que o K^+ não conseguiu estabilizar a posição de ajuste e, portanto, não é indicado. Em ambientes secos (30%) - os contra-íons tiveram maiores dificuldades de migrar e, portanto, os resultados foram **lento** para o Li^+ , **muito lento** para o H^+ . Já o Na^+ e K^+ não conseguiram ajustar e muito menos estabilizar a posição definida pelo sistema de controle.

O ensaio de performance, que na prática, pode ser definido como um ensaio cíclico, os resultados obtidos foram similares ao ensaio anterior. Em alta UR, o contra-íon que estabilizou a posição ajustada de forma **muito rápida** foi somente o H^+ , já que o mesmo em alta UR, possui migração iônica bastante significativa baseada em dois mecanismos de migração, conforme já detalhando anteriormente. O Li^+ , Na^+ e K^+ , apresentaram resposta **rápida** para o ensaio cíclico. Em UR média, o resultado foi que Li^+ e H^+ apresentaram resposta **lenta**, Na^+ **muito lenta** e K^+ não apresentou ajuste tampouco estabilidade nesse ensaio. Por fim, em baixa UR, H^+ e Li^+ apresentaram resposta **muito lenta** enquanto Na^+ e K^+ não estabilizaram na trajetória desejada.

Futuramente, novos ensaios com alterações de parâmetros de controle, DPP e UR serão necessários para corroborar os resultados aqui apresentados.

E assim tornar o método de correlação entre parâmetros de controle e propriedades do material ainda mais eficiente.

5 CONCLUSÃO

Como conclusão geral do ensaio de controle de trajetória apresentado e discutidos anteriormente, somente para o contra-íon Li^+ em UR = 90%, o sistema controlou o IPMC de maneira eficaz. O mesmo realizou controle em quatorze (14) posições distintas em relação a dez (10) e três (3) posições em UR's 60 e 30%. As taxas de deslocamento em 90% foram 4x maiores que em 60% e 44x para 30%. Nesse ensaio ficou claro a dependência do IPMC com a UR, corroborando estudos anteriores realizados pelo grupo de pesquisa, onde, de fato, o IPMC é significativamente afetado pela redução da UR.

Após os resultados dos ensaios realizados de estabilidade do sistema de controle pode-se concluir que, no geral, o sistema de controle conseguiu gerir bem a DDP nas mudanças de trajetória do IPMC em diferentes aplicações de 1, 1,5 e 2 volts. Conforme esperado, taxas de deslocamento diminuíram, conforme a UR diminuía, refletindo a da dificuldade da migração iônica. Por fim, pode-se atribuir o bom desempenho do IPMC-Li à grande camada de solvatação dos íons.

Com relação à performance cíclica, as principais conclusões são que o sistema realizou os ajustes de trajetórias satisfatoriamente para todos os contra-íons avaliados até o final do ensaio. Em ambiente úmido, o atuador apresentou perda de performance com o passar do tempo, e esse processo foi derivado do processo de evaporação do solvente facilitada por pequenas fraturas do próprio eletrodo. Além disso, o sistema de controle teve maior dificuldade de manter a trajetória do IPMC em uma das direções, resultado das diferentes condutividades dos eletrodos, corroborado no ensaio 4 pontas. Para ambientes mais secos, em UR = 60 e 30% a perda de desempenho do atuador foi menor ou quase nula. Ao alterar o contra-íon incorporado, os resultados foram bons com $R^2 = 93,0, 92,0$ e $90,0\%$ para os contra-íons H^+ , K^+ e Na^+ , respectivamente, provando que o sistema de controle realmente foi eficaz.

A relaxação reversa foi observada no ensaio com o IPMC-H, assim, quando a posição de estado estacionário era alcançada, o controlador gradualmente aumenta e oscila a DDP de controle para manter a posição

desejada, e assim contornar o fenômeno de relaxação reversa. Na análise de corrente elétrica consumida o comportamento para o IPMC-H diferenciou-se dos demais evidenciando claramente o fenômeno de eletrólise, já corroborado em outro estudo do próprio grupo de pesquisa.

O atuador IPMC dopado com contra-íons maiores, foi significativamente mais afetado pela redução da UR (Na^+ e K^+) e por isso não são recomendados para utilização em ambientes que possuam essas características.

A técnica investigativa de correlação entre parâmetros de controle para com fenômenos que ocorrem no interior do material auxiliou na escolha do contra-íon mais adequado para ser utilizado em um atuador IPMC.

Por fim, o sistema de controle PI em malha fechada usando um algoritmo de visão de máquina como *feedback* aqui proposto, foi capaz de ajustar e manter a posição do IPMC em diversos ambientes de trabalhos e com vários contra-íons incorporados provando assim a sua viabilidade. Com isso, por meio desta técnica, é possível compreender e explicar os fenômenos que ocorrem com o material, além de conseguir contornar o fenômeno de relaxação reversa que é um dos maiores desafios que tangenciam esses dispositivos atualmente.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os ensaios realizados neste trabalho foram suficientes para evidenciar que o sistema de controle proposto é funcional e eficiente. Porém, novos ensaios com alterações paramétricas serão necessários para promover otimizações, dentre eles:

- novos métodos de sintonia de controle com objetivo de encontrar o mais adequado para o sistema aqui desenvolvido;
- avaliar o desempenho do sistema de controle utilizando outro sensor de *feedback* (laser ou infravermelho) com finalidade de comparação dos resultados;
- encontrar e modelar a função de transferência para otimizar os parâmetros do sistema para IPMC;
- realizar ensaios com o sistema desenvolvido em amostras de diferentes tamanhos (comprimento, largura e espessura) com objetivo de avaliar a influência das dimensões da amostra no sistema de controle;
- condicionar as amostras diferentes tipos de solvente (etilenoglicol, glicerol, dentro outros) para avaliar a influência do solvente no controle do atuador IPMC;
- utilizar cátions orgânicos e/ou combinações para realizar novos ensaios com finalidade de avaliar o sistema de controle;
- utilização de novas matrizes poliméricas sulfonadas sintetizadas pelo próprio grupo de pesquisa avaliando seu comportamento no sistema de controle;
- estudar novos materiais nos eletrodos do IPMC para avaliar seu desempenho ao longo do tempo no sistema de controle.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. Hong, "Ion transport in ionomeric polymers for ionic electroactive polymer devices," Iowa State University, Digital Repository, Ames, 2016.
- [2] A. D. Drozdov, "Modeling the response of polymer–ionic liquid electromechanical actuators," *Acta Mech.*, vol. 227, no. 2, pp. 437–465, 2016.
- [3] M. C. Saccardo, A. G. Zuquello, K. A. Tozzi, R. Gonçalves, L. A. Hirano, and C. H. Scuracchio, "Counter-ion and humidity effects on electromechanical properties of Nafion®/Pt composites," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 244, 2020.
- [4] H. Kim, Y. Cha, and M. Porfiri, "Voltage attenuation along the electrodes of ionic polymer metal composites," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 17, pp. 2426–2430, 2016.
- [5] M. Abachizadeh, A. Yousefi-Koma, and M. Shariatpanahi, "Optimization of a beam-type ipmc actuator using insects swarm intelligence methods," in *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA2010*, 2010, vol. 1, pp. 559–566.
- [6] M. Porfiri, H. Sharghi, and P. Zhang, "Modeling back-relaxation in ionic polymer metal composites: The role of steric effects and composite layers," *J. Appl. Phys.*, vol. 123, no. 1, 2018.
- [7] H. Moeinkhah, J. Rezaeepazhand, and A. Akbarzadeh, "Analytical dynamic modeling of a cantilever IPMC actuator based on a distributed electrical circuit," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 5, p. 055033, Apr. 2013.
- [8] A. J. McDaid, K. C. Aw, S. Q. Xie, and E. Haemmerle, "Gain scheduled control of IPMC actuators with 'model-free' iterative feedback tuning," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 164, no. 1–2, pp. 137–147, Nov. 2010.
- [9] R. C. Richardson, M. C. Levesley, M. D. Brown, J. A. Hawkes, K. Watterson, and P. G. Walker, "Control of ionic polymer metal composites," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 8, no. 2, pp. 245–253, 2003.
- [10] C. Gonzalez and R. Lumia, "An IPMC microgripper with integrated actuator and sensing for constant finger-tip displacement," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 5, 2015.
- [11] A. D. Marchese, K. Komorowski, C. D. Onal, and D. Rus, "Design and control of a soft and continuously deformable 2D robotic manipulation system," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2014, pp. 2189–2196.

- [12] M. C. Saccardo *et al.*, “Electromechanical Evaluation of Ionomeric Polymer-Metal Composites Using Video Analysis,” *Mater. Res.*, vol. 24, no. suppl 2, 2021.
- [13] Y. Kaneda, N. Kamamichi, M. Yamakita, K. Asaka, and Z. W. Luo, “Control of linear artificial muscle actuator using IPMC,” *SICE 2003 Annu. Conf. (IEEE Cat. No.03TH8734)*, vol. 2, pp. 1650–1655, 2003.
- [14] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis, “Advanced nonlinear PID-based antagonistic control for pneumatic muscle actuators,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 12, pp. 6926–6937, Dec. 2014.
- [15] L. Sutton, H. Moein, A. Rafiee, J. D. W. Madden, and C. Menon, “Design of an assistive wrist orthosis using conductive nylon actuators,” in *Proceedings of the IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2016, vol. 2016-July, pp. 1074–1079.
- [16] S. Sano, K. Takagi, S. Sato, S. Hirayama, N. Uchiyama, and K. Asaka, “Robust PID force control of IPMC actuators,” in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010*, 2010, vol. 7642, p. 76421U.
- [17] N. D. Bhat and W. J. Kim, “Precision position control of ionic polymer metal composite,” *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 1, no. v, pp. 740–745, 2004.
- [18] W. Yu, “The Development of an IPMC Actuated Micropump using PID Control with Iterative Feedback Tuning,” *ResearchSpace@Auckland*, 2011.
- [19] J. Khawwaf, J. Zheng, A. Al-Cihanimi, Z. Man, and R. Nagarajah, “Modeling and tracking control of an IPMC actuator for underwater applications,” *Int. Conf. Adv. Mechatron. Syst. ICAMEchS*, pp. 550–554, 2017.
- [20] W. Kim and H. J. Kim, “Nonlinear Learning Control of Ionic Polymer Metal Composites,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, no. 11, pp. 233–238, 2013.
- [21] W. Liao, T. Yan, A. Wang, and Y. Fu, “IPMC robust nonlinear tracking control design based on a multi-objective particle swarm optimization-based RRCF approach,” *Int. Conf. Adv. Mechatron. Syst. ICAMEchS*, vol. 2015-October, pp. 571–576, 2015.
- [22] X. Wang, L. Wang, S. Guo, and J. K. Mills, “A test-bed for visual servo control of artificial muscle micro-robot with parallel architecture,” *2006 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2006*, vol. 2006, no. January, pp. 848–853, 2006.
- [23] A. Rosenfeld, “Introduction to Machine Vision,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 5, no. 3, pp. 14–17, 1985.
- [24] R. Gonçalves, K. A. Tozzi, M. C. Saccardo, A. G. Zuquello, and C. H.

- Scuracchio, "Nafion-based ionomeric polymer/metal composites operating in the air: theoretical and electrochemical analysis," *J. Solid State Electrochem.*, vol. 24, no. 8, pp. 1845–1856, 2020.
- [25] S. j. Chapman, *Fundamentos de Máquinas Eléctricas*, AMGH; 5^a e. 2013.
- [26] Y. Bar-Cohen, "EAP History, Current Status, and Infrastructure," in *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges, Second Edition*, 2nd ed., SPIE, 2010, pp. 3–50.
- [27] M. Shahinpoor, "Ionic polymer-conductor composites as biomimetic sensors, robotic actuators and artificial muscles - A review," *Electrochim. Acta*, vol. 48, no. 14-16 SPEC., pp. 2343–2353, 2003.
- [28] "Novel Electroactive Soft Actuators Based on Ionic Gel / Gold Nanocomposites Produced by Supersonic Cluster Beam Implantation Yunsong Yan University of Milan , Milan Matricola n . R10346 Supervisor : Prof . Paolo Milani Interdisciplinary Centre for Nanostr," pp. 1–162, 2016.
- [29] L. A. Hirano, M. T. Escote, L. S. Martins-Filho, G. L. Mantovani, and C. H. Scuracchio, "Development of Artificial Muscles Based on Electroactive Ionomeric Polymer-Metal Composites," *Artif. Organs*, vol. 35, no. 5, pp. 478–483, May 2011.
- [30] Q. M. Zhang *et al.*, "An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant," *Nature*, vol. 419, no. 6904, pp. 284–287, 2002.
- [31] S. Nemat-Nasser and J. Y. Li, "Electromechanical response of ionic polymer-metal composites," *J. Appl. Phys.*, vol. 87, no. 7, pp. 3321–3331, Apr. 2000.
- [32] W. Y. Hsu, T. D. Gierke, and T. D. Gierke, "Elastic Theory for Ionic Clustering in Perfluorinated Ionomers," *Macromolecules*, vol. 15, no. 1, pp. 101–105, 1982.
- [33] E. Shoji and D. Hirayama, "Effects of humidity on the performance of ionic polymer-metal composite actuators: Experimental study of the back-relaxation of actuators," *J. Phys. Chem. B*, vol. 111, no. 41, pp. 11915–11920, 2007.
- [34] F. Bauer, S. Dennerler, and M. Willert-Porada, "Influence of temperature and humidity on the mechanical properties of Nafion® 117 polymer electrolyte membrane," *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 43, no. 7, pp. 786–795, 2005.
- [35] W. Kuhn, B. Hargitay, A. Katchalsky, and H. Eisenberg, "Reversible Dilation and Contraction by Changing the State of Ionization of High-Polymer Acid Networks," *Nature*, vol. 165, no. 4196, pp. 514–516, Apr. 1950.
- [36] S. Nakshatharan, A. Punning, and A. Aabloo, "Neural network modeling

- and model predictive control of ionic electroactive polymer actuators,” *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 9798, no. April 2016, 2016.
- [37] Y. Bar-Cohen *et al.*, “Challenges to the application of IPMC as actuators of planetary mechanisms,” *Smart Struct. Mater. 2000 Electroact. Polym. Actuators Devices*, vol. 3987, p. 140, 2000.
- [38] T. D. GIERKE and W. Y. HSU, “The Cluster—Network Model of Ion Clustering in Perfluorosulfonated Membranes,” 1982, pp. 283–307.
- [39] C. Gavach, G. Pamboutzoglou, M. Nedyalkov, and G. Pourcelly, “AC impedance investigation of the kinetics of ion transport in Nafion® perfluorosulfonic membranes,” *J. Memb. Sci.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 37–53, 1989.
- [40] K. Oguro, H. Takenaka, and Y. Kawami, “Actuator Element,” *United States*, no. 5,268,082, Feb. 1993.
- [41] E. Hamburg, Z. Zondaka, A. Punning, U. Johanson, and A. Aabloo, “Some electrochemical aspects of aqueous ionic polymer-composite actuators,” *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, vol. 9798, no. April 2016, 2016.
- [42] O. C. Yilmaz *et al.*, “The effect of gold electrode thicknesses on electromechanical performance of Nafion-based Ionic Polymer Metal Composite actuators,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 165, no. November 2018, pp. 747–753, 2019.
- [43] T. J. O’Keeke, “Pourbaix Diagrams,” in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Elsevier, 2001, pp. 7774–7781.
- [44] S. Nemat-Nasser and Y. Wu, “Comparative experimental study of ionic polymer-metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms,” *J. Appl. Phys.*, vol. 93, no. 9, pp. 5255–5267, 2003.
- [45] L. A. Hirano, “Caracterização eletromecânica e eletro-morfológica de compósitos de polímero ionomérico e metal aplicados ao desenvolvimento de atuadores robóticos,” 2013.
- [46] L. A. Hirano, L. W. Acerbi, K. Kikuchi, S. Tsuchitani, and C. H. Scuracchio, “Study of the Influence of the Hydration Level on the Electromechanical Behavior of Nafion Based Ionomeric Polymer-metal Composites Actuators,” *Mater. Res. J. Mater.*, vol. 18, no. 2, pp. 154–158, 2015.
- [47] C. E. Perles, “Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion® para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC,” *Polímeros*, vol. 18, no. 4, pp. 281–288, 2008.
- [48] W. Y. Hsu and T. D. Gierke, “Ion transport and clustering in nafion perfluorinated membranes,” *J. Memb. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 307–326, Feb. 1983.

- [49] W. Y. Hsu and T. D. Gierke, "Ion transport and clustering in nafion perfluorinated membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 307–326, 1983.
- [50] H. L. Yeager, "Cation and Water Diffusion in Nafion Ion Exchange Membranes: Influence of Polymer Structure," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 128, no. 9, p. 1880, 1981.
- [51] J. A. Elliott, D. Wu, S. J. Paddison, and R. B. Moore, "A unified morphological description of Nafion membranes from SAXS and mesoscale simulations," *Soft Matter*, vol. 7, no. 15, pp. 6820–6827, Aug. 2011.
- [52] M. C. Saccardo, A. G. Zuquello, K. A. Tozzi, R. Gonçalves, L. A. Hirano, and C. H. Scuracchio, "Counter-ion and humidity effects on electromechanical properties of Nafion®/Pt composites," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 244, no. January, 2020.
- [53] M. Shahinpoor and K. J. Kim, "Effects of counter-ions on the performance of IPMCs," *Smart Struct. Mater. 2000 Electroact. Polym. Actuators Devices*, vol. 3987, no. June 2000, p. 110, 2000.
- [54] V. Vunder, E. Hamburg, U. Johanson, A. Punning, and A. Aabloo, "Effect of ambient humidity on ionic electroactive polymer actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 5, 2016.
- [55] M. D. Bennett and D. J. Leo, "Ionic liquids as stable solvents for ionic polymer transducers," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 115, no. 1, pp. 79–90, 2004.
- [56] K. Ketpang, S. Shanmugam, C. Suwanboon, N. Chanunpanich, and D. Lee, "Efficient water management of composite membranes operated in polymer electrolyte membrane fuel cells under low relative humidity," *J. Memb. Sci.*, vol. 493, pp. 285–298, 2015.
- [57] Z. Zhu, T. Horiuchi, K. Kruusamae, L. Chang, and K. Asaka, "The effect of ambient humidity on the electrical response of ion-migration-based polymer sensor with various cations," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 5, p. 0, 2016.
- [58] Z. Zhu, T. Horiuchi, K. Kruusamäe, L. Chang, and K. Asaka, "Influence of Ambient Humidity on the Voltage Response of Ionic Polymer-Metal Composite Sensor," *J. Phys. Chem. B*, vol. 120, no. 12, pp. 3215–3225, 2016.
- [59] P. Brunetto, L. Fortuna, P. Giannone, S. Graziani, and S. Strazzeri, "Static and dynamic characterization of the temperature and humidity influence on IPMC actuators," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 4, pp. 893–908, 2010.
- [60] S. Hwan Lee, E. Cho, and J. Ryouun Youn, "Rheological behavior of

- polypropylene/layered silicate nanocomposites prepared by melt compounding in shear and elongational flows," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 103, no. 6, pp. 3506–3515, Mar. 2007.
- [61] C. S. Kothera *et al.*, "Characterization, Modeling, and Control of the Nonlinear Actuation Response of Ionic Polymer Transducers Mechanical Engineering," Virginia Tech, 2005.
- [62] D. B. Spry, A. Goun, K. Glusac, D. E. Moilanen, and M. D. Fayer, "Proton transport and the water environment in Nafion fuel cell membranes and AOT reverse micelles," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 129, no. 26, pp. 8122–8130, 2007.
- [63] Tibor Erdey-Grúz, *Transport Phenomena in Aqueous Solutions*. 1974.
- [64] M. E. Tuckerman, D. Marx, and M. Parrinello, "The nature and transport mechanism of hydrated hydroxide ions in aqueous solution," *Nature*, vol. 417, no. 6892, pp. 925–929, 2002.
- [65] Thomas Lawrence Kalapos, "Interaction of water with the proton exchange fuel cell membrane," 2007.
- [66] S. G. and T. A. . Zawodzinski", "Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFCs)," pp. 301–311, 1997.
- [67] N. S. NISE, *Engenharia de Sistemas de Controle*. 2012.
- [68] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. 2010.
- [69] V. Vunder, M. Itik, I. Põldsalu, A. Punning, and A. Aabloo, "Inversion-based control of ionic polymer-metal composite actuators with nanoporous carbon-based electrodes," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 2, 2014.
- [70] V. Vunder, M. Itik, A. Punning, and A. Aabloo, "Force control of ionic polymer-metal composite actuators with carbon-based electrodes," no. March 2014, p. 90561Y, 2014.
- [71] R. Dong and X. Tan, "Modeling and open-loop control of IPMC actuators under changing ambient temperature," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 6, p. 065014, Jun. 2012.
- [72] K. Mallavarapu and D. J. Leo, "Feedback control of the bending response of ionic polymer actuators," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 12, no. 3, pp. 143–155, 2001.
- [73] "A Control-Oriented and Physics-Based Model for Ionic Polymer–Metal Composite Actuators."
- [74] K. Yun and W. J. Kim, "System identification and microposition control of ionic polymer metal composite for three-finger gripper manipulation," *Proc.*

- Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 220, no. 7, pp. 539–551, 2006.
- [75] B. C. Lavu, M. P. Schoen, and A. Mahajan, “Adaptive intelligent control of ionic polymer-metal composites,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 14, no. 4, pp. 466–474, 2005.
- [76] X. Chen, *Adaptive control for ionic polymer-metal composite actuator based on continuous-time approach*, vol. 19, no. 3. IFAC, 2014.
- [77] L. Hao and Z. Li, “Modeling and adaptive inverse control of hysteresis and creep in ionic polymer-metal composite actuators,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 2, 2010.
- [78] L. Hao, Z. Sun, Z. Li, Y. Su, and J. Gao, “A novel adaptive force control method for IPMC manipulation,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 7, 2012.
- [79] D. Liu, A. J. McDaid, K. C. Aw, and S. Q. Xie, “Position control of an Ionic Polymer Metal Composite actuated rotary joint using Iterative Feedback Tuning,” *Mechatronics*, vol. 21, no. 1, pp. 315–328, Feb. 2011.
- [80] W. J. Yoon, P. G. Reinhall, and E. J. Seibel, “Analysis of electro-active polymer bending: A component in a low cost ultrathin scanning endoscope,” *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 133, no. 2 SPEC. ISS., pp. 506–517, 2007.
- [81] X. Tant *et al.*, “An autonomous robotic fish for mobile sensing,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 5424–5429, 2006.
- [82] L. Cuiyan, Z. Dongchun, and Z. Xianyi, “A survey of repetitive control,” *2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2, pp. 1160–1166, 2004.
- [83] T. Inoue, M. Nakano, T. Kubo, S. Matsumoto, and H. Baba, “High Accuracy Control of a Proton Synchrotron Magnet Power Supply.,” pp. 3137–3142, 1982.
- [84] S. Hara, Y. Yamamoto, T. Omata, and M. Nakano, “Repetitive Control System: A New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 33, no. 7, pp. 659–668, 1988.
- [85] D. Control, O. Repetitive, E. In, and M. Tounia, “WP3 - 5:30 Digital Control Of Repetitive Errors In,” *Control*, pp. 540–548.
- [86] Y. Wang, F. Gao, and F. J. Doyle, “Survey on iterative learning control, repetitive control, and run-to-run control,” *J. Process Control*, vol. 19, no. 10, pp. 1589–1600, 2009.
- [87] S. Song, Y. Shan, K. J. Kim, and K. K. Leang, “Tracking control of oscillatory motion in IPMC actuators for underwater applications,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, pp. 169–174, 2010.

- [88] K. K. Leang, Y. Shan, S. Song, and K. J. Kim, "Integrated sensing for IPMC actuators using strain gages for underwater applications," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 17, no. 2, pp. 345–355, 2012.
- [89] J. D. Carrico, M. Fleming, M. A. Tsugawa, and K. K. Leang, "Precision feedback and feedforward control of ionic polymer metal composite actuators," in *RSC Smart Materials*, vol. 2016-Janua, no. 17, 2016, pp. 354–385.
- [90] D. Wang, Q. Zhang, A. Wang, and T. Yan, "Robust nonlinear tracking control design for IPMC using Neural Network based sliding mode approach," *Int. Conf. Adv. Mechatron. Syst. ICAMEchS*, pp. 1–6, 2014.
- [91] J. Khawwaf, J. Zheng, R. Lu, A. Al-Ghanimi, B. I. Kazem, and Z. Man, "Robust tracking control of an IPMC actuator using nonsingular terminal sliding mode," *Smart Mater. Struct.*, vol. 26, no. 9, 2017.
- [92] R. Caponetto, S. Graziani, V. Tomasello, and A. Pisano, "Identification and Fractional Super-Twisting Robust Control of IPMC Actuators," *Fract. Calc. Appl. Anal.*, vol. 18, no. 6, pp. 1358–1378, 2015.
- [93] L. Hao, Y. Chen, and Z. Sun, "The sliding mode control for different shapes and dimensions of IPMC on resisting its creep characteristics," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 4, p. 45040, 2015.
- [94] J. Khawwaf, J. Zheng, R. Chai, R. Lu, and Z. Man, "Adaptive Microtracking Control for an Underwater IPMC Actuator Using New Hyperplane-Based Sliding Mode," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 24, no. 5, pp. 2108–2117, 2019.
- [95] M. R. S. Kolahi and H. Moeinkhah, "Robust super-twisting sliding mode controller with state observer for position tracking of ionic polymer–metal composite actuators," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 2020.
- [96] N. Bhat and W. J. Kim, "Precision force and position control of an ionic polymer metal composite," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 218, no. 6, pp. 421–432, 2004.
- [97] S. S. Nakshatharan, V. Vunder, I. Põldsalu, U. Johanson, A. Punning, and A. Aabloo, "Modelling and control of ionic electroactive polymer actuators under varying humidity conditions," *Actuators*, vol. 7, no. 1, p. 7, Feb. 2018.
- [98] Z. Chen and X. Tan, "Model-based nonlinear control of ionic polymer-metal composite actuators," *Proc. ASME Dyn. Syst. Control Conf. 2009, DSCC2009*, no. PART A, pp. 469–476, 2010.
- [99] H. L. Xing, J. H. Jeon, K. C. Park, and I. K. Oh, "Active disturbance rejection control for precise position tracking of ionic polymer-metal composite actuators," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 18, no. 1, pp. 86–95, 2013.

- [100] J. Hwan Lee *et al.*, "Time-delay control of ionic polymer metal composite actuator," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 4, 2015.
- [101] K. K. Ahna, D. Q. Truong, D. N. C. Nam, J. Il Yoon, and S. Yokotac, "Position control of ionic polymer metal composite actuator using quantitative feedback theory," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 159, no. 2, pp. 204–212, 2010.
- [102] H. Moeinkhah, A. Akbarzadeh, and J. Rezaeepazhand, "Design of a robust quantitative feedback theory position controller for an ionic polymer metal composite actuator using an analytical dynamic model," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, no. 15, pp. 1965–1977, 2014.
- [103] B. T. Wescott, "PID without a PhD," 2000.
- [104] M. E. S. Goodwin, Graham C. , Stefan F. Graebe, "Classical PID Control," *Control Systems Design*, 2000. [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>.
- [105] M. Deng and A. Wang, "Robust non-linear control design to an ionic polymer metal composite with hysteresis using operator-based approach," *IET Control Theory Appl.*, vol. 6, no. 17, pp. 2667–2675, 2012.
- [106] A. Wang, G. Wei, and H. Wang, "Operator based robust nonlinear control design to an ionic polymer metal composite with uncertainties and input constraints," *Appl. Math. Inf. Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 2471–2477, 2014.
- [107] E. Zakeri and H. Moeinkhah, "Digital control design for an IPMC actuator using adaptive optimal proportional integral plus method: Simulation and experimental study," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 298, p. 111577, 2019.
- [108] L. Chen and D. Xue, "Simulation of Fractional order control based on IPMC model," *26th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2014*, pp. 598–601, 2014.
- [109] A. Tepljakov *et al.*, "Fractional-order modeling and control of ionic polymer-metal composite actuator," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 8, 2019.
- [110] B. K. Fang, M. S. Ju, and C. C. K. Lin, "A new approach to develop ionic polymer-metal composites (IPMC) actuator: Fabrication and control for active catheter systems," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 137, no. 2, pp. 321–329, 2007.
- [111] L. Fu, A. J. McDaid, and K. C. Aw, "Control of an IPMC actuated robotic surgical tool with embedded interaction sensing," *2013 IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics Mechatronics Hum. Wellbeing, AIM 2013*, pp. 1255–1259, 2013.
- [112] A. Aabloo, J. Belikov, V. Kaparin, and U. Kotta, "Challenges and

- Perspectives in Control of Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) Actuators: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121059–121073, 2020.
- [113] M. H. Kim *et al.*, "An experimental study of force control of an IPMC actuated two-link manipulator using time-delay control," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 11, pp. 1–13, 2016.
- [114] I. Must *et al.*, "Ionic liquid-based actuators working in air: The effect of ambient humidity," *Sensors Actuators, B Chem.*, vol. 202, pp. 114–122, 2014.
- [115] V. Vunder, E. Hamburg, U. Johanson, A. Punning, and A. Aabloo, "Effect of ambient humidity on ionic electroactive polymer actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 5, pp. 1–11, 2016.
- [116] R. Caponetto, V. De Luca, and S. Graziani, "A multiphysics model of IPMC actuators dependence on relative humidity," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, vol. 2015-July, pp. 1482–1487, 2015.
- [117] J. Bernat and J. Kolota, "Adaptive observer-based control for an IPMC actuator under varying humidity conditions," *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, no. 5, 2018.
- [118] Z. Chen, D. R. Hedgepeth, and X. Tan, "A nonlinear, control-oriented model for ionic polymer-metal composite actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 5, pp. 1851–1856, 2009.
- [119] M. Sasaki, W. Lin, H. Tamagawa, S. Ito, and K. Kikuchi, "Self-sensing control of Nafion-based Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) actuator in the extremely low humidity environment," *Actuators*, vol. 2, no. 4, pp. 74–85, 2013.
- [120] Z. Chen, D. R. Hedgepeth, X. Tan, A. Hunt, Z. Chen, and X. Tan, "composite Sensorless position estimator applied to nonlinear IPMC model."
- [121] B. Kazem and J. Khawwaf, "Estimation bending deflection in an Ionic Polymer Metal Composite (IPMC) material using an artificial neural network model," *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 123–131, 2016.
- [122] D. Q. Truong, K. K. Ahn, D. N. C. Nam, and J. Il Yoon, "Identification of a nonlinear black-box model for a self-sensing polymer metal composite actuator," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 8, p. 085015, 2010.
- [123] A. Punning, M. Kruusmaa, and A. Aabloo, "A self-sensing ion conducting polymer metal composite (IPMC) actuator," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 136, no. 2, pp. 656–664, 2007.
- [124] K. Kruusamäe, P. Brunetto, S. Graziani, A. Punning, G. Di Pasquale, and A. Aabloo, "Self-sensing ionic polymer-metal composite actuating device

- with patterned surface electrodes," *Polym. Int.*, vol. 59, no. 3, pp. 300–304, 2010.
- [125] L. Ferrara *et al.*, "<title>Use of ionic polymer-metal composites (IPMCs) as a pressure transducer in the human spine</title>," *Smart Struct. Mater. 1999 Electroact. Polym. Actuators Devices*, vol. 3669, no. March, pp. 394–401, 1999.
- [126] K. Park *et al.*, "IPMC based biosensor for the detection of biceps brachii muscle movements," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 4098–4109, 2013.
- [127] B. G. Ko, H. C. Kwon, and S. Lee, "A self-sensing method for IPMC actuator," *CIMTEC 2008 - Proc. 3rd Int. Conf. Smart Mater. Struct. Syst. - Embodying Intell. Struct. Integr. Syst.*, vol. 56, pp. 111–115, 2008.
- [128] B. Koo, D. S. Na, and S. Lee, *Control of IPMC actuator using self-sensing method*, vol. 42, no. 3. IFAC, 2009.
- [129] P. Bakhtiarpour, A. Parvizi, M. Müller, M. Shahinpoor, O. Marti, and M. Amirkhani, "An external disturbance sensor for ionic polymer metal composite actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 1, p. 15008, 2015.
- [130] Z. Chen, K. Y. Kwon, and X. Tan, "Integrated IPMC/PVDF sensory actuator and its validation in feedback control," *Sensors Actuators, A Phys.*, 2008.
- [131] Z. Chen, "Feedback Control of a Coupled IPMC (Ionic Polymer-Metal Composite) Sensor-Actuator," pp. 1–7, 2018.
- [132] A. Hunt, Z. Chen, X. Tan, and M. Kruusmaa, "An integrated electroactive polymer sensor – actuator: design , model-based control , and performance characterization," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 3, p. 0, 2016.
- [133] A. Hunt, *Application-Oriented Performance Characterization of the Ionic Polymer Transducers (IPTs)*. 2017.
- [134] J. Wang, A. J. McDaid, C. Z. Lu, and K. C. Aw, "A compact Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) actuated valveless pump for drug delivery," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 22, no. 1, pp. 196–205, 2017.
- [135] K. Kim and R. C. Schaefer, "Tuning a PID controller for a digital excitation control system," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 485–492, 2005.
- [136] W. J. Palm, "Basic Control Systems Design," *Eshbach's Handb. Eng. Fundam. Fifth Ed.*, pp. 760–801, 2009.
- [137] D. A. Forsyth, *Computer Vision: A Modern Approach*. 2011.
- [138] M. S. V. H. R. Boyle, *Image processing, analysis and machine vision*, vol.

- 6, no. 3. 1994.
- [139] Y. H. Anis, M. R. Holl, and D. R. Meldrum, "Automated selection and placement of single cells using vision-based feedback control," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 3, pp. 598–606, 2010.
- [140] K. Tsiakmakis, J. Brufau, M. Puig-Vidal, and T. Laopoulos, "Measuring motion parameters of ionic polymer-metal composites (IPMC) actuators with a CCD camera," *Conf. Rec. - IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 1–6, 2007.
- [141] K. Tsiakmakis and T. Laopoulos, "Improving processing time for visual measurements of displacements of IPMC actuators using CUDA," in *2010 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, 2010, pp. 176–181.
- [142] D. Koniar, L. Hargas, A. Simonova, M. Hrianka, and Z. Loncova, "Virtual Instrumentation for Visual Inspection in Mechatronic Applications," *Procedia Eng.*, vol. 96, pp. 227–234, 2014.
- [143] S. Slade, S. A. Campbell, T. R. Ralph, and F. C. Walsh, "Ionic Conductivity of an Extruded Nafion 1100 EW Series of Membranes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 149, no. 12, p. A1556, 2002.
- [144] K. Oguro, "Ion-Exchange Polymer Metal Composites (IPMC) Membranes," pp. 4–6, 2005.
- [145] Anon, "National Instruments," *Scientific Computing and Instrumentation*, 1999. [Online]. Available: <https://www.ni.com/pt-br.html>.
- [146] V. Vunder, M. Itik, A. Punning, and A. Aabloo, "Force control of ionic polymer-metal composite actuators with carbon-based electrodes," *Electroact. Polym. Actuators Devices 2014*, vol. 9056, p. 90561Y, 2014.
- [147] M. Shahinpoor, "Chapter 1. Fundamentals of Ionic Polymer Metal Composites (IPMCs)," 2015, pp. 1–60.
- [148] D. L. Chinaglia, G. Gozzi, R. A. M. Alfaro, and R. Hessel, "Espectroscopia de impedancia no laboratorio de ensino," vol. 4, p. 4504, 2008.
- [149] D. L. Chinaglia, G. Gozzi, R. A. M. Alfaro, and R. Hessel, "Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino," *Rev. Bras. Ensino Fis.*, vol. 30, no. 4, Oct. 2008.
- [150] L. A. Hirano, L. W. Acerbi, K. Kikuchi, S. Tsuchitani, and C. H. Scuracchio, "Study of the Influence of the Hydration Level on the Electromechanical Behavior of Nafion Based Ionomeric Polymer-metal Composites Actuators," *Mater. Res.*, vol. 18, no. suppl 2, pp. 154–158, 2015.
- [151] J. Bisquert, "Influência of the boundaries in the impedance of porous TiO_2

- electrodes.pdf,” 2000.
- [152] I. Gamry Instruments, “Use of Transmission Lines for Electrochemical Impedance Spectroscopy,” *Rev. 2.1 10/21/2014 (C) Copyright 1990-2014*, 2014. [Online]. Available: <https://www.gamry.com/application-notes/EIS/use-of-transmission-lines-for-eis/>.
- [153] I. Must, *Ionic and capacitive electroactive laminates with carbonaceous electrodes as sensors and energy harvesters*. 2014.
- [154] Z. Zhu *et al.*, “Comparative experimental investigation on the actuation mechanisms of ionic polymer-metal composites with different backbones and water contents,” *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 12, 2014.
- [155] P. Nardinocchi, M. Pezzulla, B. J. Akle, M. Guenther, and T. Wallmersperger, “Actuation and buckling effects in IPMCs,” *Proc. SPIE 9056*, vol. 9056, no. March 2014, p. 90560K, 2014.
- [156] J. Zhou, X. Lu, Y. Wang, and J. Shi, “Molecular dynamics study on ionic hydration,” *Fluid Phase Equilib.*, vol. 194–197, pp. 257–270, 2002.
- [157] B. Tansel *et al.*, “Significance of hydrated radius and hydration shells on ionic permeability during nanofiltration in dead end and cross flow modes,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 51, no. 1, pp. 40–47, 2006.
- [158] A. Kusoglu and A. Z. Weber, “Electrochemical/Mechanical Coupling in Ion-Conducting Soft Matter,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 6, no. 22, pp. 4547–4552, 2015.
- [159] S. Taghavi, F. Mohammadi, and J. Barzin, “Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) from recycled Flemion(r) membrane used in chlor-alkali industry,” *Sci. Iran.*, vol. 23, no. 3, pp. 1117–1128, 2016.
- [160] J. C. Bendert, D. D. Papadimas, and D. J. Myers, “The effect of Na⁺ impurities on the conductivity and water uptake of nafion 115 polymer electrolyte fuel cell membranes,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, no. 10, 2010.
- [161] N.-S. Choi *et al.*, “Challenges Facing Lithium Batteries and Electrical Double-Layer Capacitors,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 51, no. 40, pp. 9994–10024, Oct. 2012.
- [162] J. C. Bendert, D. D. Papadimas, and D. J. Myers, “The Effect of Na⁺ Impurities on the Conductivity and Water Uptake of Nafion 115 Polymer Electrolyte Fuel Cell Membranes,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, no. 10, p. B1486, 2010.
- [163] M. E. Orazem and B. Tribollet, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. New York: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2008.

- [164] N. D. Bhat and W. J. Kim, "Precision position control of ionic polymer metal composite," *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 1, pp. 740–745, 2004.
- [165] K. Tsiakmakis and T. Laopoulos, "Image analysis for measuring motion parameters with a CCD camera," *Proc. 2007 IEEE Int. Work. Imaging Syst. Tech. IST'07*, pp. 1–6, 2007.
- [166] V. Vunder, A. Punning, and A. Aabloo, "Long-term behavior of ionic electroactive polymer actuators in variable humidity conditions," *Electroact. Polym. Actuators Devices*, vol. 9430, no. April 2015, p. 94300R, 2015.
- [167] B. Tondu, A. Simaite, G. K. Hari Shankar Lal Das, P. Soueres, and C. Bergaud, "Efficient Linear Approach for the Closed-Loop Control of a Ionic Polymer Bending Actuator," *Adv. Sci. Technol.*, vol. 97, pp. 75–80, Oct. 2016.
- [168] M. J. Lee, S. H. Jung, S. Lee, M. S. Mun, and I. Moon, "Control of IPMC-based artificial muscle for myoelectric hand prosthesis," *Proc. First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, 2006, BioRob 2006*, vol. 2006, pp. 1172–1177, 2006.
- [169] C. S. Kothera and D. J. Leo, "Position control of a square-plate ionic polymer actuator using output feedback," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 18, no. 3, pp. 219–234, 2007.
- [170] A. Al-Allaq, B. Ansaf, N. Jaksic, and J. L. Depalma, "Modified Nernst-Plank-Poisson Model & Control for IPMC with NI-ELVIS II," Preprints, Feb. 2020.
- [171] A. Hunt, Z. Chen, X. Tan, and M. Kruusmaa, "An integrated electroactive polymer sensor-actuator: Design, model-based control, and performance characterization," *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 3, p. 0, 2016.
- [172] B. Mead, S. Ruiz, and W. Yim, "Closed-loop control of a tube-type cylindrical IPMC," *Electroact. Polym. Actuators Devices 2013*, vol. 8687, no. April 2013, p. 86872Q, 2013.
- [173] K. Aw, L. Fu, and A. McDaid, "An IPMC actuated robotic surgery end effector with force sensing," *Int. J. Smart Nano Mater.*, vol. 4, no. 4, pp. 246–256, Dec. 2013.
- [174] A. Hunt, Z. Chen, X. Tan, and M. Kruusmaa, "Feedback control of acoupled IPMC (Ionic Polymer-Metal Composite) sensor-actuator," in *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Conference 2009, DSCC2009*, 2010, no. PART A, pp. 485–491.
- [175] S. Nemat-Nasser, "Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites," *J. Appl. Phys.*, vol. 92, no. 5, pp. 2899–2915, 2002.
- [176] S. Taghavi, F. Mohammadi, and J. Barzin, "Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) from recycled Flemion(r) membrane used in chlor-

- alkali industry," *Sci. Iran.*, vol. 23, no. 3, pp. 1117–1128, 2016.
- [177] K. Park, M. K. Yoon, S. Lee, J. Choi, and M. Thubrikar, "Effects of electrode degradation and solvent evaporation on the performance of ionic-polymer-metal composite sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19, no. 7, 2010.
- [178] M. Shahinpoor, *Ionic Polymer Metal Composites (IMPCs): Smart Multi-Functional Materials and Artificial Muscles Volume 2*, vol. 2. 2015.
- [179] Z. Zhu *et al.*, "NMR study on mechanisms of ionic polymer-metal composites deformation with water content," *Epl*, vol. 96, no. 2, 2011.
- [180] Z. Lu, G. Polizos, D. D. Macdonald, and E. Manias, "State of Water in Perfluorosulfonic Ionomer (Nafion 117) Proton Exchange Membranes," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 155, no. 2, p. B163, 2008.
- [181] Y. Bahramzadeh and M. Shahinpoor, "A Review of Ionic Polymeric Soft Actuators and Sensors," *Soft Robot.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–52, 2014.
- [182] V. Vunder, A. Punning, and A. Aabloo, "Mechanical interpretation of back-relaxation of ionic electroactive polymer actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, no. 11, 2012.
- [183] Y. Bahramzadeh and M. Shahinpoor, "A Review of Ionic Polymeric Soft Actuators and Sensors," *Soft Robot.*, vol. 1, no. 1, pp. 38–52, 2014.
- [184] G. F. Franklin, J. D. Powell, F. Marketing, and M. Demetrius, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 8^a. 2017.
- [185] I. A. Levitsky, P. T. Kanelos, and W. B. Euler, "Novel actuating system based on a composite of single-walled carbon nanotubes and an ionomeric polymer," in *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, 2003, vol. 785, pp. 293–298.
- [186] Z. Yang, H. Peng, W. Wang, and T. Liu, "Rheological Behavior of Polypropylene/Layered Silicate Nanocomposites Prepared by Melt Compounding in Shear and Elongational Flows," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 116, no. 5, pp. 2658–2667, 2010.
- [187] H. Yoshida and Y. Miura, "Behavior of water in perfluorinated ionomer membranes containing various monovalent cations," *J. Memb. Sci.*, vol. 68, no. 1–2, pp. 1–10, 1992.
- [188] D. C. Grahame, "The electrical double layer and the theory of electrocapillarity," *Chem. Rev.*, vol. 41, no. 3, pp. 441–501, 1947.
- [189] S. I. Rich, R. J. Wood, and C. Majidi, "Untethered soft robotics," *Nat. Electron.*, vol. 1, no. 2, pp. 102–112, 2018.
- [190] M. Nakamura, N. Sato, N. Hoshi, and O. Sakata, "Outer Helmholtz Plane

- of the Electrical Double Layer Formed at the Solid Electrode-Liquid Interface," *ChemPhysChem*, vol. 12, no. 8, pp. 1430–1434, Jun. 2011.
- [191] Z. Zhu, H. Chen, L. Chang, B. Li, and Y. Wang, "Influence of fabrication process steps on Pd-IPMC electrode morphologies and mechano-electrical properties," in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011*, 2011, vol. 7976, p. 79762T.
- [192] F. Garczarek and K. Gerwert, "Functional waters in intraprotein proton transfer monitored by FTIR difference spectroscopy," *Nature*, vol. 439, no. 7072, pp. 109–112, 2006.
- [193] K. D. Kreuer, "Proton conductivity: Materials and applications," *Chem. Mater.*, vol. 8, no. 3, pp. 610–641, 1996.
- [194] J. Park, V. Palmre, T. Hwang, K. Kim, W. Yim, and C. Bae, "Electromechanical performance and other characteristics of IPMCs fabricated with various commercially available ion exchange membranes," *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 7, 2014.
- [195] I. Must *et al.*, "Pulse-width-modulated charging of ionic and capacitive actuators," *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, pp. 1446–1451, 2014.
- [196] W. Y. Hsu and T. D. Gierke, "Ion transport and clustering in nafion perfluorinated membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 13, no. 3, pp. 307–326, Feb. 1983.
- [197] N.-S. Choi *et al.*, "Challenges Facing Lithium Batteries and Electrical Double-Layer Capacitors," *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 51, no. 40, pp. 9994–10024, Oct. 2012.
- [198] M. Nakamura, N. Sato, N. Hoshi, and O. Sakata, "Outer Helmholtz Plane of the Electrical Double Layer Formed at the Solid Electrode-Liquid Interface," *ChemPhysChem*, vol. 12, no. 8, pp. 1430–1434, Jun. 2011.
- [199] S. Nemat-Nasser and S. Zamani, "Experimental study of Nafion- and Flemion-based ionic polymer metal composites (IPMCs) with ethylene glycol as solvent," *Smart Structures and Materials 2003: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. 2003.
- [200] M. Uchida and M. Taya, "Solid polymer electrolyte actuator using electrode reaction," *Polymer (Guildf)*, vol. 42, no. 22, pp. 9281–9285, 2001.
- [201] K. Asaka, K. Oguro, Y. Nishimura, M. Mizuhata, and H. Takenaka, "Bending of Polyelectrolyte Membrane-Platinum Composites by Electric Stimuli I. Response Characteristics to Various Waveforms," *Polym. J.*, vol. 27, no. 4, pp. 436–440, 1995.
- [202] S. Zamani and S. Nemat-Nasser, "Controlled actuation of Nafion-based

- ionic polymer-metal composites (IPMCs)with ethylene glycol as solvent,” *Smart Struct. Mater. 2004 Electroact. Polym. Actuators Devices*, vol. 5385, p. 159, 2004.
- [203] Z. Zhu, L. Chang, K. Takagi, Y. Wang, H. Chen, and D. Li, “Water content criterion for relaxation deformation of Nafion based ionic polymer metal composites doped with alkali cations,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, no. 5, pp. 1–4, 2014.
- [204] V. Vunder, E. Hamburg, U. Johanson, A. Punning, and A. Aabloo, “Effect of ambient humidity on ionic electroactive polymer actuators,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 5, p. 055038, May 2016.
- [205] B. R. Matos *et al.*, “Dc Proton conductivity at low-frequency in Nafion conductivity spectrum probed by time-resolved SAXS measurements and impedance spectroscopy,” *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.*, vol. 53, no. 11, pp. 822–828, 2015.

APÊNDICE A

Código do software desenvolvido para realizar o controle de umidade.

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>

#define DHT_pin 12
#define DHT_energy 13
#define SEALEVELPRESSURE_HPA (1013.25)
#define wet_pin 8
#define dry_pin 9

Adafruit_BME280 bme;

int sensor = A0; //Pino analógico em que o sensor está conectado.
int valorSensor = 0; //Usada para ler o valor do sensor em tempo real.
int pot_val = 0;
int H_read = 0;

int ajust = 90; // Umidade ajustada

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(wet_pin, OUTPUT);
  pinMode(dry_pin, OUTPUT);
  pinMode(DHT_energy, OUTPUT); // energia do DHT

  digitalWrite(wet_pin, HIGH); // Bombas começarão
  digitalWrite(dry_pin, HIGH); // desligadas

  if (!bme.begin(0x76)) {
    Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
    while (1);
  }
}

void loop() {

  // Lendo temperatura e umidade:
  digitalWrite(DHT_energy, HIGH); // liga DHT
  delay(500);
  float H_a = (bme.readHumidity());
  float T_a = (bme.readTemperature());

  delay(250);
```

```

float H_b = (bme.readHumidity());
float T_b = (bme.readTemperature());
delay(250);
float H_c = (bme.readHumidity());
float T_c = (bme.readTemperature());

float H_mean = ((H_a + H_b + H_c) / 3);
float T_mean = ((T_a + T_b + T_c) / 3);

H_read = H_mean;

if (isnan(H_a) || isnan(H_b) || isnan(H_c))
{
digitalWrite(DHT_energy, LOW); // desliga DHT
delay(500);
Serial.println("Sensor desconectado!");
return;
}

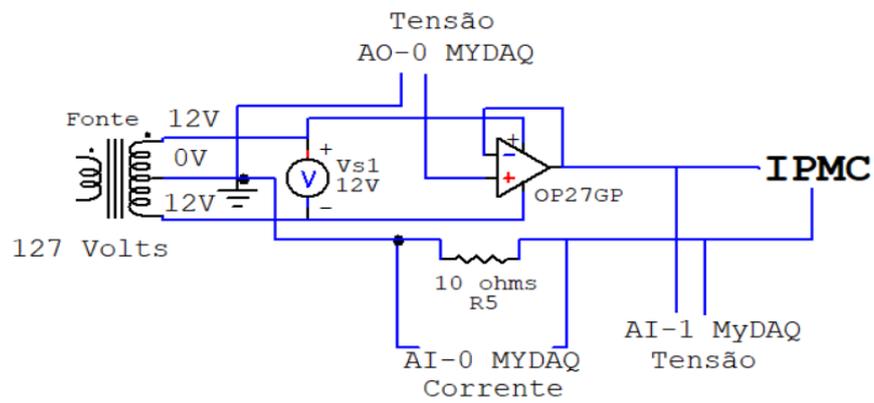
// Teste para acionar bombas:
if (H_read < ajust)
{
digitalWrite(wet_pin, LOW);
digitalWrite(dry_pin, HIGH);
}
else if (H_read > ajust)
{
digitalWrite(wet_pin, HIGH);
digitalWrite(dry_pin, LOW);
}
else if (H_read == ajust)
{
digitalWrite(wet_pin, HIGH);
digitalWrite(dry_pin, HIGH);
}
Serial.print(T_mean);
Serial.print(",");
Serial.print(H_mean);
Serial.print(",");
Serial.print(bme.readAltitude(SEALEVELPRESSURE_HPA));
Serial.print(",");
Serial.print(bme.readPressure() / 100.0F);
Serial.print(",");
//Lendo o valor do sensor.
int valorSensor = analogRead(sensor);
//Exibindo o valor do sensor no serial monitor.
Serial.print(valorSensor);

```

```
Serial.println();  
delay(500);  
}
```


APÊNDICE B

A representação abaixo, ilustra o circuito elétrico montado para acionar o IPMC.



APÊNDICE C

Sistema de controle de trajetória de IPMC desenvolvido em LabVIEW – Painel frontal na Figura 8.81 e Diagrama de Blocos B.82.

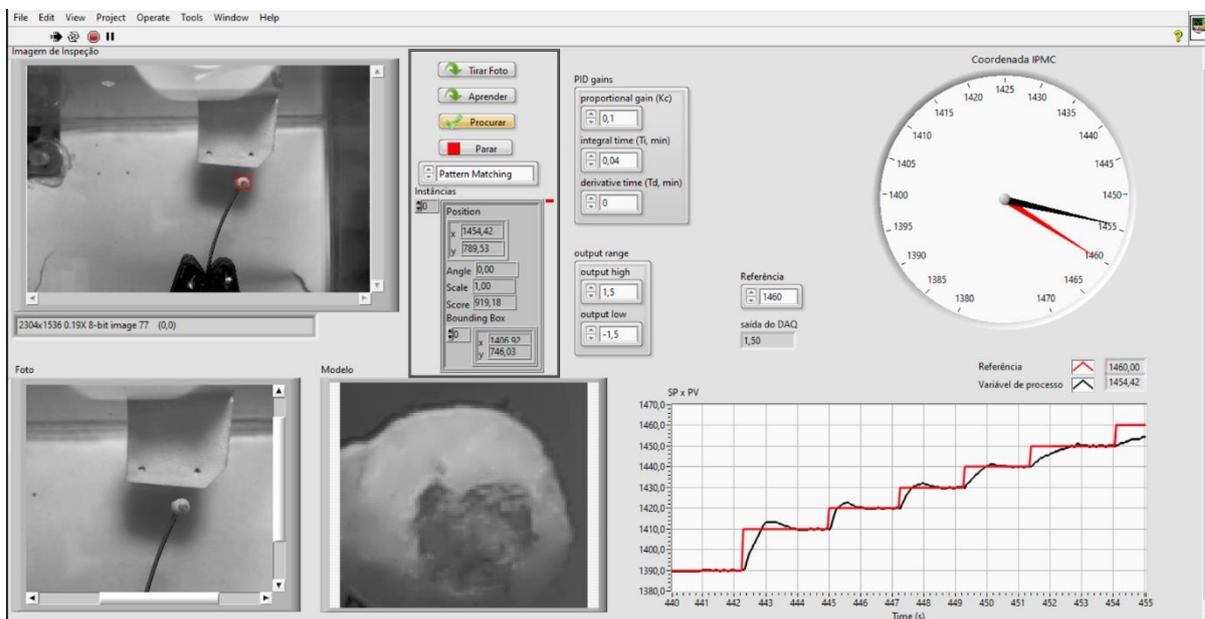


Figura B.88- Painel frontal do sistema de controle desenvolvido.

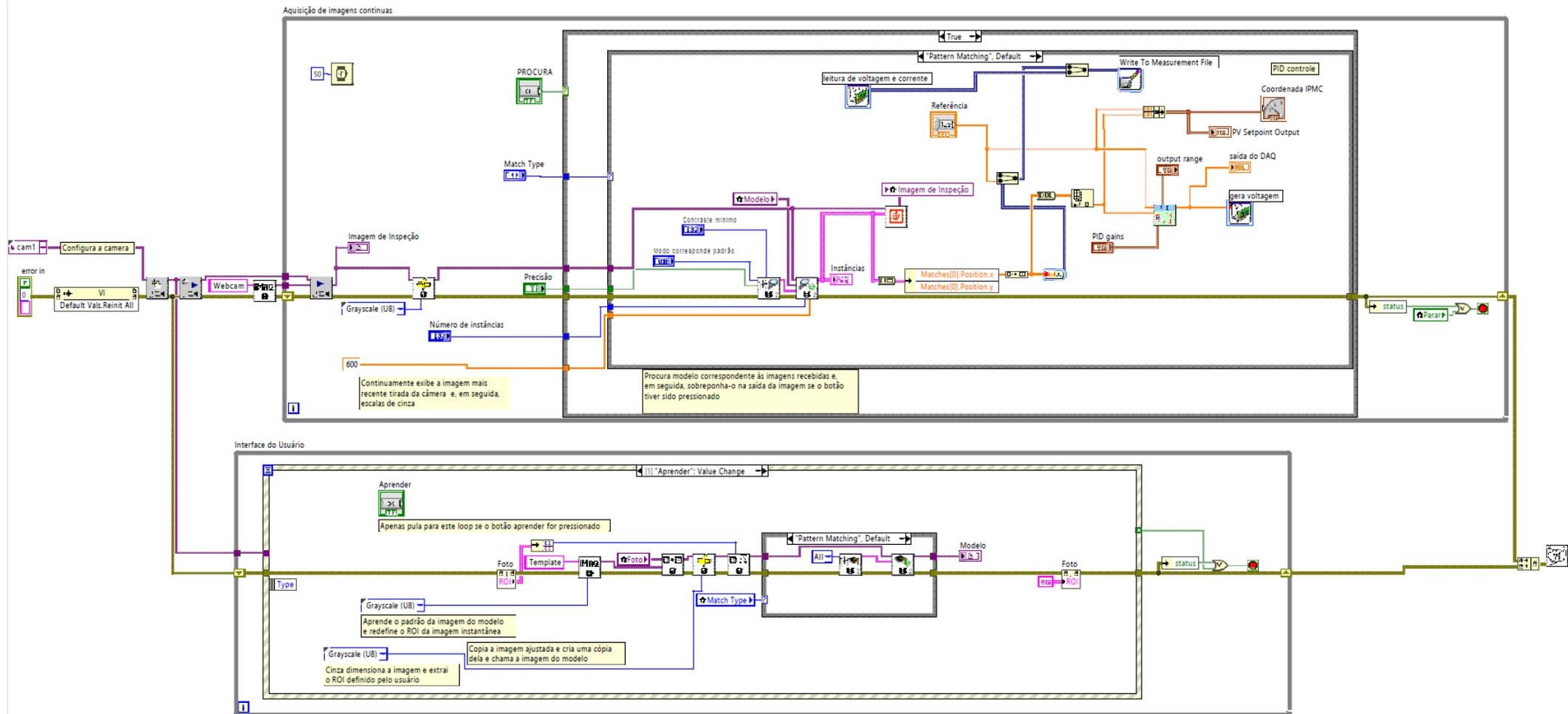


Figura B.89 - Software de reconhecimento de padrões

APÊNDICE D

O software foi desenvolvido em três partes principais e as mesmas estão ilustradas na Figura 8.83

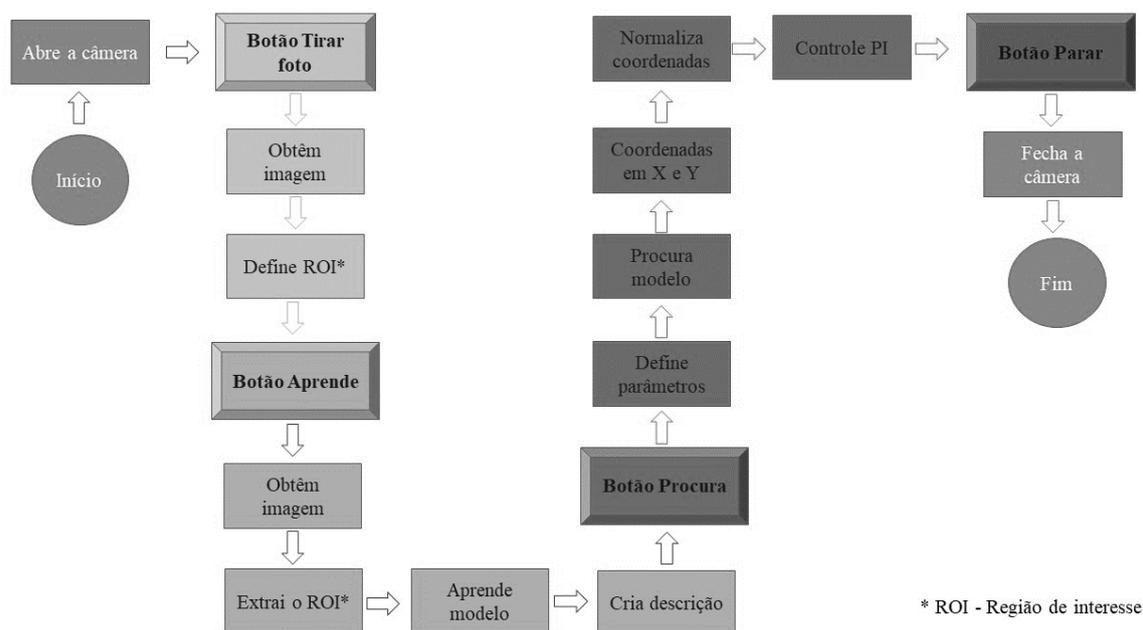


Figura B.90 - Fluxograma do software de reconhecimento de padrões e controle.

O software executa dois laços de repetição em paralelo, o primeiro, possui uma estrutura interna com três eventos (**Tirar Foto - 0, Aprende - 1, Parar - 2**). Enquanto o segundo possui apenas uma estrutura de eventos (**0 - Procura**). O objetivo de se executar o sistema em laços separados foi o fato de dividir as tarefas de execução, minimizando retardos no disparo dos eventos.

A primeira etapa do software é inicializada com a abertura da câmera, nesse momento o usuário escolhe, caso tenha mais que uma câmera em seu computador, o bloco do software utilizado foi o *IMAQdx Open Camera*, o mesmo abre e configura recursos da câmera selecionada.

Com a imagem instanciada em tempo real, o sistema executa a transformação da imagem colorida em escala de cinza utilizando o módulo *IMAQdx Cast Image*. E assim, uma foto pode ser obtida clicando no botão **Tirar**

Foto (0). Ao clicar nesse botão, o software dispara o evento **0** do laço de repetição enquanto, conforme ilustrado na Figura B.84 abaixo.

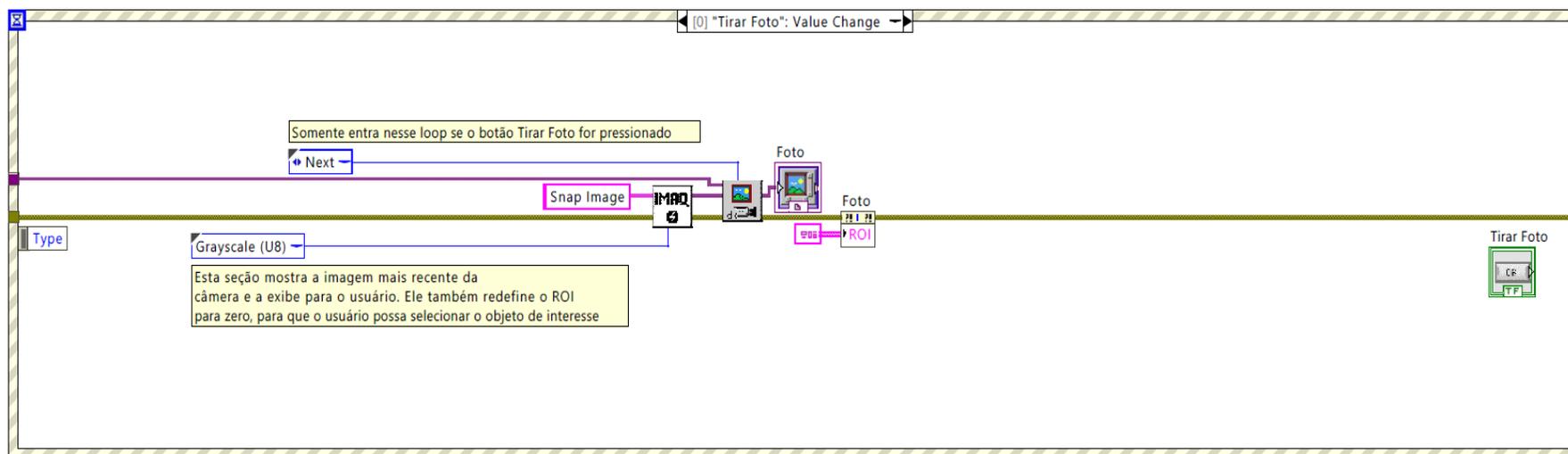


Figura B.91 - Parte do software responsável por **tirar foto**

Ao selecionar o evento **0**, uma foto é tirada e mostrada em uma janela paralela com a redefinição da ROI (Região de interesse, do inglês - *Region of Interest*) para o valor zero, isto é, limpa a ROI e espera uma nova seleção. E, portanto, uma nova ROI é selecionada pelo usuário clicando no botão **Aprende**.

Esse botão aciona a estrutura de eventos mudando-a para **1**. E então realiza o aprendizado da ROI como o modelo.

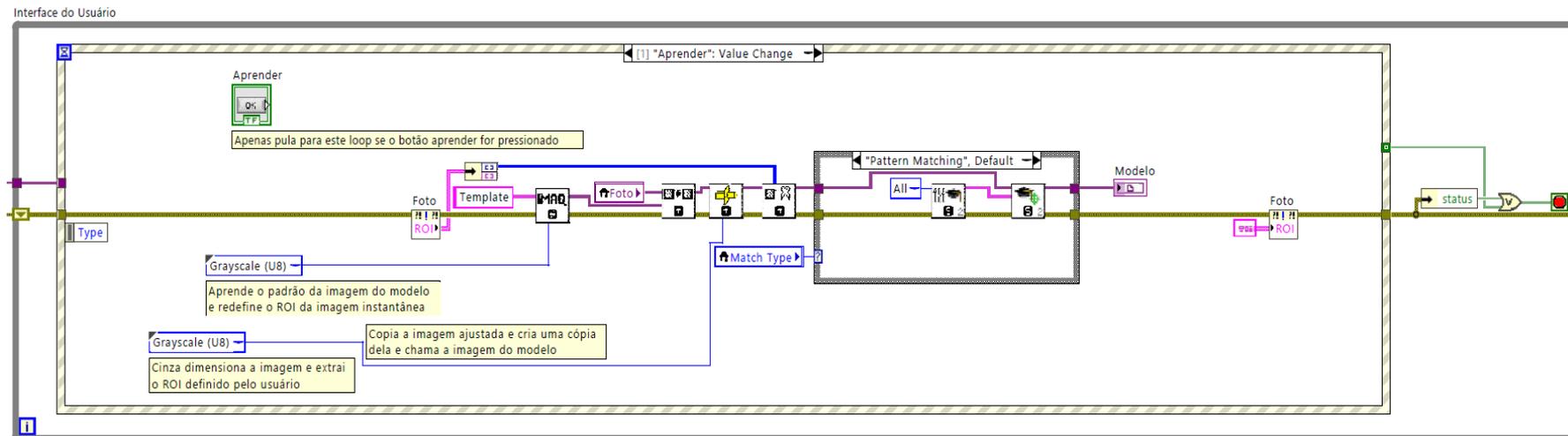


Figura B.92 - Parte do software responsável por **aprender** o modelo

Os módulos responsáveis por realizar esse aprendizado são: *IMAQ Setup Learn Pattern* onde são definidos os parâmetros usados na fase de aprendizagem e o *IMAQ Learn Pattern* que cria uma descrição da imagem que se deseja pesquisar durante a fase de correspondência do modelo. Esses dados de descrição são anexados à imagem do modelo de entrada e durante a fase de correspondência, o descritor do modelo é extraído da imagem do modelo e usado para pesquisá-lo na imagem de inspeção.

Dois algoritmos podem ser utilizados nessa etapa, um de reconhecimento de padrão geométrico ou um de correspondência de padrão. Porém, após ensaios preliminares optou-se pelo algoritmo de correspondência de padrão, pois mostrou-se mais eficiente com a variação de luminosidade do ambiente e com o movimento do IPMC.

O módulo de Correspondência de padrão (traduzido do inglês, *match pattern*), localiza rapidamente regiões de uma imagem em escala de cinza que correspondem a um padrão de referência conhecido, também conhecido como modelo.

Ao usar o módulo correspondência de padrão, é criado um modelo que representa o objeto pelo qual está pesquisando. E em seguida, procura por instâncias do modelo em cada imagem adquirida, calculando uma pontuação para cada correspondência (0-1000). Essa pontuação relaciona a semelhança entre o modelo e as correspondências localizadas, independentemente da variação de iluminação, desfoque, ruído e transformações geométricas como deslocamento ou rotação do modelo.

Em geral, esse módulo de padrão de correspondência funciona bem em imagens onde o modelo é proveniente de escala de cinza. Sua limitação ocorre quando a imagem de correspondência apresentar 10% ou mais da sua imagem ocluída. O detalhamento do algoritmo utilizado está na seção 5.2.6.

O segundo laço enquanto é executado em paralelo no sistema somente quando o botão **Procura** é acionado. Esse evento tem por finalidade inicializar a etapa de correlação entre o modelo criado e a imagem inspecionada. Inicialmente define-se os parâmetros que serão utilizados na etapa de correspondência de padrões com o módulo *IMAQ Setup Match Pattern* e na sequência, pesquisa-se o modelo na imagem de inspeção utilizando o módulo *IMAQ Match Pattern*. A parte do software responsável por procurar o padrão está ilustrada na Figura B.86.

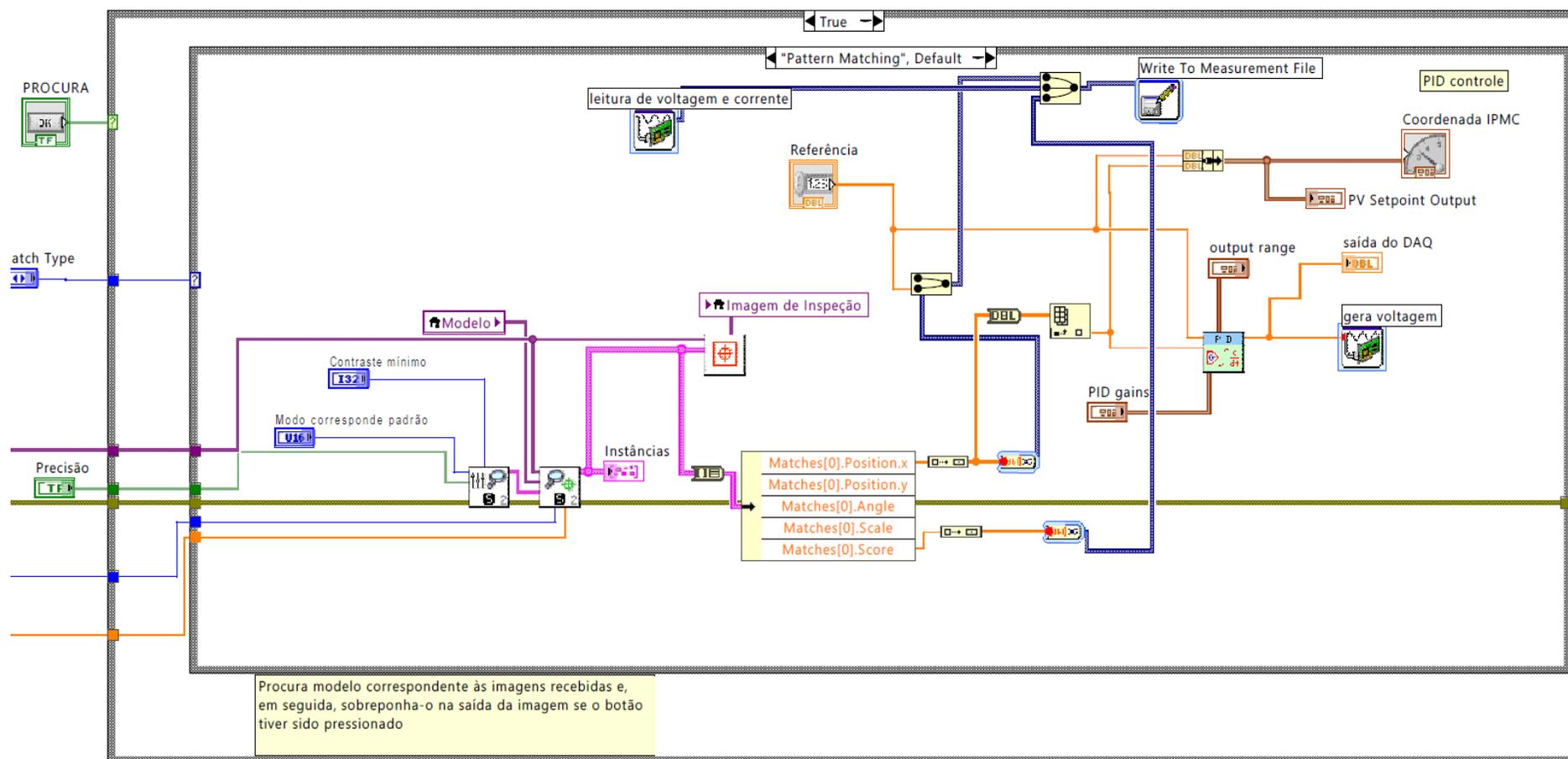


Figura B.93 - Parte do software responsável por **procurar** o modelo criado

Ao encontrar a imagem correspondente ao modelo, o sistema retorna as suas coordenadas x e y , essa tarefa é realizada pelo módulo *Draw Pattern Matches Position*. As coordenadas retornadas são baseadas na resolução que foi definida na imagem de inspeção que foi 2304x1536, isto é, 2304 pixels no eixo x e 1536 no eixo y .

Como a disposição do IPMC dentro do suporte de acrílico foi na posição vertical, bastou utilizar um vetor com a coordenada no eixo x como variável de processo na entrada do controlador e armazenar essa posição em um arquivo de *log*, juntamente com os valores da corrente e DDP para posterior análise dos resultados.

Por fim, ao clicar no botão **Parar (2)**, o evento de parada é acionado e o programa para a execução, fechando a câmera e gravando os arquivos de *log* em um local especificados pelo usuário.

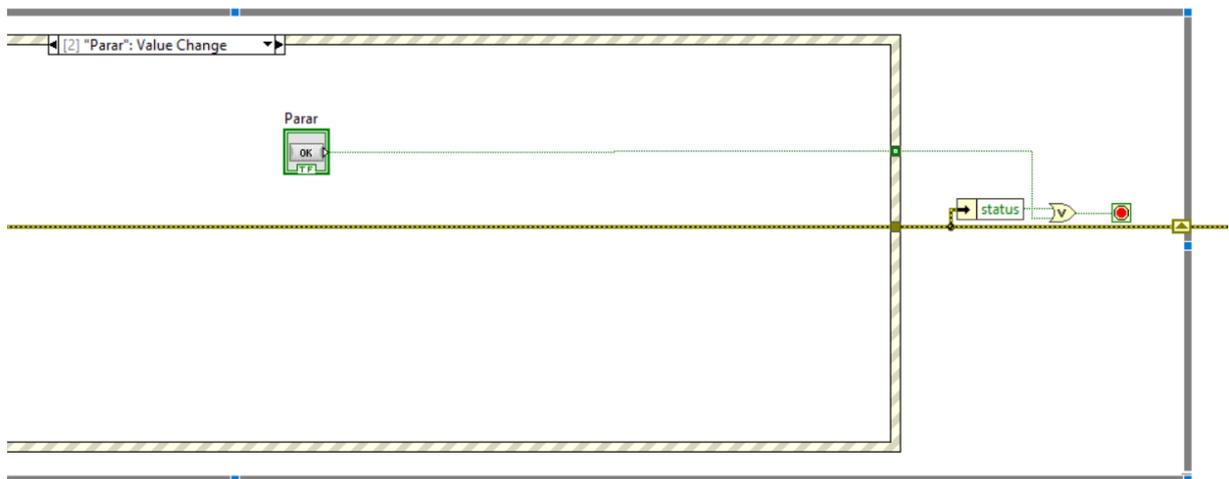


Figura B.94 - Parte do software responsável por **parar** o software.

APÊNDICE E

Implementação do controlador PID

Para a implementação do controlador, utilizou-se o módulo *NI_PID*. O mesmo implementa o controlador usando um algoritmo PID. Além disso, utilizou-se como parâmetros de entrada para o módulo: *SetPoint* (valor ajustado como a posição desejada do atuador IPMC), *process variable* (posição atual do IPMC em tempo real), *PID gains* (K_c , T_i , T_d). Já como parâmetro de saída (*output*) utilizou-se a tensão calculada pelo algoritmo na porta A0-0 do MyDAQ. Uma representação dessa configuração está ilustrada na Figura D.88.

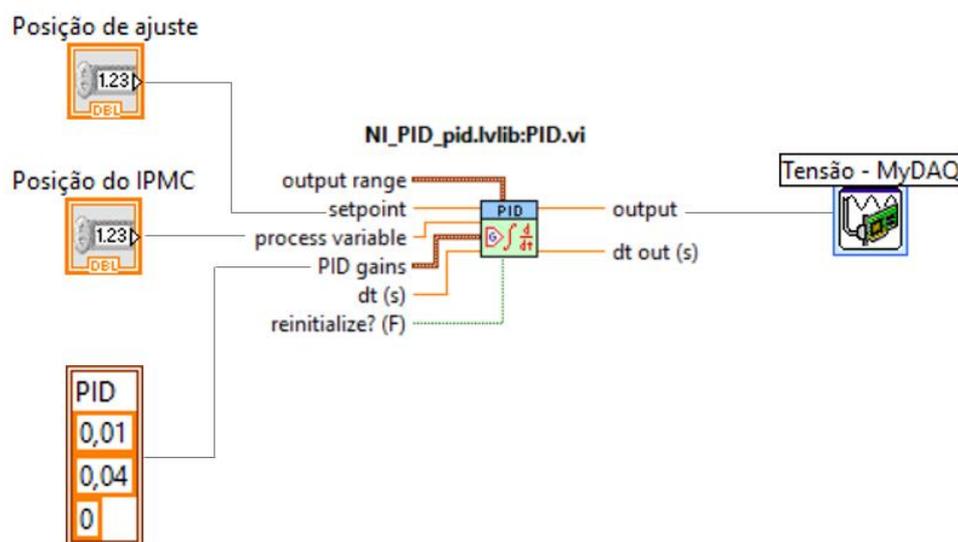


Figura D.95 - Representação da configuração do PID no sistema de controle